

Українська державна академія залізничного транспорту

ФАКУЛЬТЕТ АВТОМАТИКИ, ТЕЛЕМЕХАНІКИ ТА  
ЗВ'ЯЗКУ

Кафедра «Транспортний зв'язок»

## **МЕТОДИЧНІ ВКАЗІВКИ**

до курсового та дипломного проектування  
з дисципліни

*«Системи зв'язку з рухомими об'єктами»*

Харків 2012

Методичні вказівки розглянуто та рекомендовано на засіданні кафедри «Транспортний зв'язок» 17 лютого 2011 р., протокол № 7.

Методичні вказівки рекомендуються для студентів факультету АТЗ спеціальності «Телекомунікаційні системи та мережі» і спеціалізації «Автоматизовані системи технологічного зв'язку на залізничному транспорті» всіх форм навчання.

Укладачі:

проф. О.П. Батаєв,  
доценти В.П. Лисечко,  
В.М. Харченко, О.С. Жученко,  
асп. Ю.Г. Степаненко

Рецензент

доц. К.С. Клименко

## ЗМІСТ

	Основні скорочення і аббревіатура.....	5
	Вступ.....	6
1	Оцінка відношення сигнал/шум для станцій супутникового зв'язку, що працюють через геостаціонарний супутник-ретранслятор.....	7
1.1	Розрахунок потужності сигналу на вході приймача бортового ретранслятора.....	9
1.1.1	Визначення відстані між земною станцією і супутником.....	10
1.1.2	Визначення кутів взаємної орієнтації наземних і бортових антен.....	11
1.1.3	Характеристики наземних і бортових антен.....	13
1.1.4	Розрахунок ослаблення сигналу за рахунок поглинання енергії радіохвиль в атмосфері.....	16
1.1.4.1	Розрахунок ослаблення сигналу за рахунок поглинання енергії радіохвиль у газах атмосфери і водяній парі.....	16
1.1.4.2	Розрахунок ослаблення сигналу, викликаного дощем....	18
1.2	Розрахунок відношення сигнал/шум на вході бортового приймача.....	22
1.3	Розрахунок потужності сигналу на вході приймача земної станції.....	24
1.3.1	Коефіцієнт корисної дії передавача бортового ретранслятора.....	26
1.3.2	Розрахунок потужності бортового передавача, що ефективно використовується.....	27
1.4	Розрахунок відношення сигнал/шум на трасі «борт-земля».....	28
1.5	Розрахунок відношення сигнал/шум на трасі "земля-борт-земля".....	30
2	Початкові дані, методика і результати розрахунку енергетичного потенціалу і пропускної спроможності супутникових радіоліній і мереж.....	31
2.1	Основні характеристики БР КАЗ, що забезпечують можливість функціонування ЗС.....	33
2.1.1	Основні характеристики БР КАЗ "Горизонт".....	34
2.1.2	Основні характеристики БР КАЗ "Експрес".....	38

2.1.3	Основні характеристики БР КАЗ "Експрес-А".....	41
2.1.4	Основні характеристики БР КАЗ системи "Intelsat".....	47
2.2	Вибір типу і характеристик ЗС для побудови мереж супутникового зв'язку.....	48
2.3	Визначення допустимої потужності передавача ЗС.....	49
2.4	Розрахунок пропускної спроможності мережі супутникового зв'язку.....	51
2.5	Телевізійні стандарти зображення.....	58
2.5.1	Стандарти PAL, SECAM, NTSC.....	58
2.5.2	Стандарти MAC і MUSE.....	59
2.5.3	Стандарт MPEG .....	60
2.6	Енергетичний розрахунок мережі телевізійного мовлення.....	61
	Список літератури.....	65
	Додаток А. Опис реалізованої на ПЕОМ методики енергетичного розрахунку супутникової радіолінії.....	66

## ОСНОВНІ СКОРОЧЕННЯ І АБРЕВІАТУРА

АХТ – антенно-хвилевідний тракт  
БА – бортова антена  
БР – бортовий ретранслятор  
ВЦМТ – вторинний цифровий мережний тракт  
БР КАЗ – бортовий ретранслятор космічного апарату зв'язку  
ГО – геостаціонарна орбіта  
ДС – діаграма спрямованості  
ЗС – земна станція  
ШСЗ – штучний супутник Землі  
КАЗ – космічний апарат зв'язку  
ККД, к.к.д. – коефіцієнт корисної дії  
КС – космічна станція  
БДЧ – багатостанційний доступ з розділенням за часом  
БДКР – багатостанційний доступ із кодовим розділенням  
БДЧР – багатостанційний доступ з частотним розділенням  
МККР – Міжнародний Консультативний Комітет із Радіозв'язку  
МСЕ – Міжнародний Союз Електрозв'язку  
МШП – підсилювач з малим шумом  
ОКН – один канал на несучій  
ОЦК – основний цифровий канал  
ПМЗ – програмно-математичне забезпечення  
ПЦМТ - первинний цифровий мережний тракт  
НВЧ – надвисока частота  
ССП – супутникові системи передачі  
ССЗ – система супутникового зв'язку  
СТМ – супутникове телемовлення  
ТБ - телебачення  
ТЦМТ - третинний цифровий мережний тракт  
ТБВЧ – телемовлення високої чіткості  
ФМ – фазова модуляція  
ФСЗ – фіксований супутниковий зв'язок  
ЕОМ – електронно-обчислювальна машина  
ЕІВП – еквівалентна ізотропно-випромінювана потужність  
ЕМС – електромагнітна сумісність

## ВСТУП

Для зв'язку з рухомими об'єктами на великих відстанях широко використовуються штучні супутники Землі (ШСЗ). Одним з етапів проектування систем супутникового зв'язку є енергетичний розрахунок радіоліній, на підставі якого задаються вимоги до характеристик земних станцій і бортових ретрансляторів. Енергетичний розрахунок служить також для оцінок електромагнітної сумісності (ЕМС) наземних і космічних радіослужб і завадозахисних супутникових радіоліній.

У даних методичних вказівках ставиться мета дати систематичний виклад питань, необхідних для проектування супутникових радіоліній зв'язку і мовлення, побудованих на базі геостаціонарних супутників-ретрансляторів. Викладено методику розрахунку основних характеристик супутникових радіоліній і мереж, засновану на використанні Рекомендацій Міжнародного Консультативного Комітету з Радіозв'язку (МККР), що дозволяє отримати точність оцінок, цілком достатню для розв'язання прикладних інженерних задач. Особливістю методичних вказівок є те, що в них наведено практично всі початкові дані і довідковий матеріал, необхідний для виконання розрахунків, а процедури обчислень адаптовані для розв'язання задач на персональних ЕОМ.

Методичні вказівки підготовлено відповідно до програм дисциплін "Теорія електричного зв'язку", "Системи зв'язку з рухомими об'єктами" і "Багатоканальні системи передачі". Їх також можна використати при виконанні відповідних розрахункових задач на етапах курсового і дипломного проектування.

# 1 Оцінка відношення сигнал/шум для станцій супутникового зв'язку, що працюють через геостаціонарний супутник-ретранслятор

Енергетичний розрахунок супутникових радіоліній і мереж дає відповідь на одну з головних питань проектування систем супутникового зв'язку – якими характеристиками повинні володіти земні станції і бортові ретранслятори космічних апаратів зв'язку для забезпечення необхідної швидкості передачі інформації і заданого ступеня відповідності (достовірності) переданого і прийнятого повідомлень. Незалежно від виду передаваного повідомлення швидкість і достовірність передачі інформації залежать від енергетичного потенціалу супутникової радіолінії, який визначає відношення потужності сигналу до потужності шуму і завад на вході демодулятора приймача ЗС. Передбачається, що смуги частот основної селекції приймального тракту узгоджені з шириною спектра випромінюючого сигналу.

Розрахунок відношення сигнал/шум виконується таким чином:

1 Розраховується потужність сигналу на вході приймача бортового ретранслятора  $P_{ВХ.Б}$ . При цьому враховуються географічні координати передавальної станції супутникового зв'язку, параметри орбіти супутника-ретранслятора, кути взаємної орієнтації діаграм спрямованості наземної і бортової антен, а також додаткові втрати, що виникають при розповсюдженні сигналу в атмосфері.

2 Розраховується відношення сигнал/шум на вході бортового приймача супутника-ретранслятора  $g_{ВХ.Б}$ .

3 Розраховується потужність сигналу на вході приймача земної станції супутникового зв'язку  $P_{ВХ.ЗС}$  у припущенні використання для ретрансляції сигналу тієї частки потужності бортового передавача, яка витрачається на випромінювання корисного сигналу.

4 Оцінюється потужність шуму в смузі, яка узгоджена з шириною спектра випромінюючого сигналу  $P_{ШИ.ЗС}$ , і розраховується відношення сигнал/шум  $g_{ВХ.ЗС}$  на вході демодулятора приймача земної станції супутникового зв'язку з

заданими географічними координатами, тобто на трасі «борт-земля».

5 Знаходиться сумарне відношення сигнал/шум на трасі "земля-борт-земля"  $g_{\Sigma зс}$ , що приходить на вхід демодулятора приймача земної станції супутникового зв'язку. Для цього використовуються результати, отримані в п. 2 і 4, і співвідношення

$$g_{\Sigma зс} = \left[ \frac{1}{g_{ВХ.Б}} + \frac{1}{g_{ВХ.ЗС}} \right]^{-1}. \quad (1.1)$$

6 При використуванні  $N$  незалежних сигналів, що проходять через нелінійний ретранслятор, по-перше, потужність бортового передавача перерозподіляється між вхідними сигналами (при рівних потужностях вхідних сигналів розподіляється порівну), по-друге, частина потужності бортового передавача витрачається на перевипромінювання шумів, а також продуктів нелінійних спотворень і, по-третє, продукти нелінійних спотворень створюють додаткові завади в кожному з  $N$  каналів. Якщо частка продуктів нелінійних спотворень  $\alpha_{НЕЛ}$ , залежна від режиму роботи ретранслятора і розставлення частот у смузі ствола, визначена, то потужність бортового ретранслятора, що використовується для передачі корисних сигналів, Вт, дорівнює

$$P^*_{ПД.Б} = P_{ПД.Б} \eta_{ПД.Б} (1 - \alpha_{НЕЛ}), \quad (1.2)$$

де  $\eta_{ПД.Б}$  – к.к.д. бортового ретранслятора.

Для подальших розрахунків більш зручною є логарифмічна міра. З урахуванням цього потужність бортового ретранслятора, що використовується для передачі корисних сигналів, дБВт, дорівнює

$$P^*_{ПД.Б} = P_{ПД.Б} + \eta_{ПД.Б} + 10 \lg(1 - \alpha_{НЕЛ}). \quad (1.3)$$

Нижче визначаються всі параметри, необхідні для реалізації даної методики.



## 1.1 Розрахунок потужності сигналу на вході приймача бортового ретранслятора

Потужність сигналу на вході приймача бортового ретранслятора, дБВт, розраховуватимемо, використовуючи відоме співвідношення [3]

$$P_{ВХ.Б} = P_{ПД.ЗС} + G_{ПД.ЗС}(\Delta\gamma) - b_{ПД.ЗС} - 20\lg\left(\frac{4\pi d}{\lambda_p}\right) + G_{ПР.Б}(\Delta\Omega) - b_{ПР.Б} - A_{ao} - A_o(T), \quad (1.4)$$

де  $P_{ПД.ЗС}$  – потужність передавача ЗС, дБВт;

$G_{ПД.ЗС}(\Delta\gamma)$  – коефіцієнт направленої дії передавальної антени земної станції, дБВт, в напрямі на супутник-ретранслятор, залежний від діаметра дзеркала  $D_{А.ЗС}$  антени ЗС, коефіцієнта використання площі розкриття антени  $\nu$ , відносної точності виготовлення антени  $k$  і робочої довжини хвилі;

$\Delta\gamma$  – кут між напрямом максимального випромінювання антени ЗС і напрямом на супутник, що характеризує помилку наведення антени;

$b_{ПД.ЗС}$  – втрати в передавальному фідері ЗС, дБ;

$d$  – відстань між землею станцією і супутником, м;

$\lambda_p$  – робоча довжина хвилі, м;

$G_{ПР.Б}(\Delta\Omega)$  – коефіцієнт направленої дії приймальної антени бортового ретранслятора в заданому напрямі, дБ, залежний від величини осей еліпса перетину діаграми спрямованості (ДС)  $\alpha^\circ \times \beta^\circ$  на рівні -3 дБ і форми ДС антени;

$\Delta\Omega$  – кут між напрямом орієнтації приймальної антени супутника і напрямом на земну станцію, залежний від географічних широти  $\varphi$  і довготи  $\psi$  земної станції супутникового зв'язку, параметрів орбіти (висоти  $H$  і координат підсупутникової точки  $\varphi_n$ ), а також координат точки прицілювання бортової антени супутника-ретранслятора  $\varphi_u$  і  $\psi_u$ ;

$b_{ПР.Б}$  – втрати в приймальному фідері бортового ретранслятора, дБ;

$A_{ao}$  – втрати в атмосфері, дБ (у кисні і водяній парі);

$A_o(T)$  – втрати в дощі,  $\delta B$ , які перевищуються в перебігу  $T\%$  часу.

Додаткові втрати в основному визначаються поглинанням в атмосфері і поляризаційними втратами. Вони залежать від кута місця  $\theta$  і кліматичного району, в якому розташована земна станція, а також від робочої частоти передачі і приймання.

З перерахованих параметрів вихідними для розрахунку є:  $\lambda_P$ ;  $P_{ПД.ЗС}$ ;  $D_{А.ЗС}$ ;  $b_{ПД.ЗС}$ ;  $\Delta\gamma$ ;  $\alpha^\circ \times \beta^\alpha$ ;  $b_{ПР.Б}$ ;  $\varphi$  і  $\psi$ ;  $\varphi_n$  и  $\psi_n$ ;  $\varphi_u$  и  $\psi_u$ . Решта параметрів підлягає розрахунку.

### 1.1.1 Визначення відстані між земною станцією і супутником

Відстань між земною станцією і супутником (похила дальність) визначається відомим співвідношенням [1]

$$d = \left[ (R_z + H)^2 + R_z^2 - 2 \cdot (R_z + H) \cos \varphi \cdot \cos \Delta\psi \right]^{1/2}, \quad (1.5)$$

де  $R_z$  – радіус Землі;

$H$  – висота орбіти супутника над поверхнею Землі;

$\varphi$  – географічна широта земної станції;

$\Delta\psi$  – різниця по довготі між підсупутниковою точкою і наземною станцією.

Обчислення відстані  $d$  повинне вестися при виконанні умови забезпечення прямої видимості між супутником і наземною станцією, яка може бути виведеною з нерівності

$$H \leq d \leq d_{MAX}, \quad (1.6)$$

де  $d_{MAX}$  – максимальне значення похилої дальності, що визначається виразом

$$d_{MAX} = \left[ (R_z + H)^2 - R_z^2 \right]^{1/2}. \quad (1.7)$$

З виразів (1.5), (1.6), (1.7), підставляючи значення радіуса Землі  $R_3$  і висоту геостаціонарної орбіти, нескладно отримати необхідну умову у вигляді

$$\cos \varphi \cdot \cos \Delta \psi \geq \frac{R_3}{R_3 + H} \quad (1.8)$$

Таким чином, спочатку перевіряється виконання істинності умови (1.8), а потім проводиться обчислення похилої дальності за виразом (1.5). Якщо умова (1.8) не виконується, радіолінія з розгляду виключається.

### 1.1.2 Визначення кутів взаємної орієнтації наземних і бортових антен

Як випливає з виразу (1.4), втрати передачі на трасі "Земля – супутник" залежать від взаємної орієнтації передавальної і приймальної антен.

Для розрахунків втрат необхідно обчислити кут (див. рисунок 1.1), визначуваний взаємним положенням наземної станції, підсупутникової точки і центра зони обслуговування (точки, на яку орієнтована бортова антена), а також кут  $\Delta \varphi$ , визначуваний точністю наведення антени земної станції на супутник.

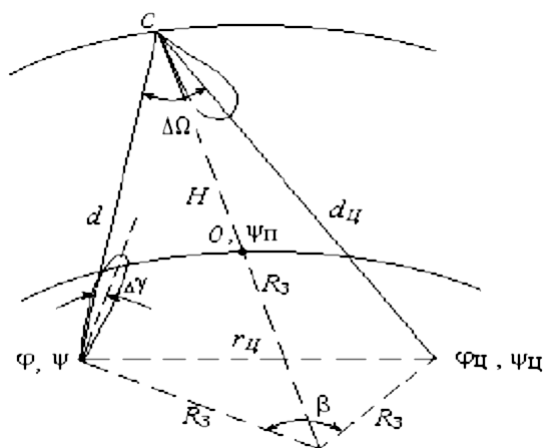


Рисунок 1.1 – Обчислення кутів  $\Delta \Omega$  і  $\Delta \varphi$ .

Початковими для розрахунку кута  $\Delta\Omega$  є:

- координати підсупутникової точки, визначувані її довготою  $\psi_{п.}$ ;

- координати центра зони обслуговування для даного супутника  $\varphi_{ц.}, \psi_{ц.}$ ;

- координати земної станції  $\varphi, \psi$ .

Для розв'язання поставленої задачі заздалегідь виведемо співвідношення, що визначає кут  $\alpha$  між двома сторонами трикутника при відомих довжинах  $a, b$  і  $c$  (рисунок 1.2).

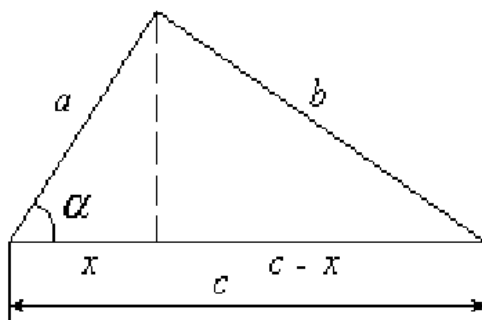


Рисунок 1.2 – Обчислення кута  $\alpha$

З елементарних геометричних побудов легко отримати систему рівнянь

$$\begin{cases} h^2 = b^2 - (c - x)^2; \\ h^2 = a^2 - x^2, \end{cases}$$

розв'язуючи яку відносно  $x$ , маємо

$$x = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2c}.$$

Далі, оскільки

$$\cos \alpha = \frac{x}{a} = \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac},$$

одержуємо

$$\alpha = \arccos \frac{a^2 + c^2 - b^2}{2ac}. \quad (1.9)$$

Для того щоб скористатися формулою (1.9) при обчисленні кута  $\Delta\Omega$ , необхідно знати відстані  $d$ ,  $d_{ц}$  і  $r_{ц}$ . Перші дві величини обчислюються відповідно до раніше наведеного співвідношення (1.5), а відстань між землею станцією і центром зони обслуговування визначається виразом

$$r_{ц} = 2R_3 \sin \frac{\beta}{2} = 2R_3 \sqrt{1 - \cos^2 \frac{\beta}{2}}, \quad (1.10)$$

де

$$\cos \beta = \cos(\varphi_{ц} - \varphi) \cos(\psi_{ц} - \psi). \quad (1.11)$$

На підставі виразів (1.10) і (1.11) і враховуючи, що

$$\cos^2 \frac{\beta}{2} = \frac{1}{2}(1 + \cos \beta),$$

Одержуємо

$$r_{ц} = \sqrt{2}R_3 \sqrt{1 - \cos(\varphi_{ц} - \varphi) \cos(\psi_{ц} - \psi)}. \quad (1.12)$$

Тепер, використовуючи позначення рисунка 1.1, формул (1.9), (1.5) і (1.12), ми можемо записати вираз для обчислення  $\Delta\Omega$ :

$$\Delta\Omega = \arccos \frac{d^2 + d_{ц}^2 - r_{ц}^2}{2d d_{ц}}, \quad (1.13)$$

де

$$d = \left[ (R_3 + H)^2 + R_3^2 - 2 \cdot (R_3 + H) \cos \varphi \cdot \cos(\psi_n - \psi) \right]^{1/2}; \quad (1.14)$$

$$d_{ц} = \left[ (R_3 + H)^2 + R_3^2 - 2 \cdot (R_3 + H) \cos \varphi_{ц} \cdot \cos(\psi_n - \psi_{ц}) \right]^{1/2}; \quad (1.15)$$

$$r_{ц} = \sqrt{2}R_3 \left[ 1 - \cos(\varphi_{ц} - \varphi) \cos(\psi_{ц} - \psi) \right]^{1/2}. \quad (1.16)$$

### 1.1.3 Характеристики наземних і бортових антен

Після того як кути взаємної орієнтації бортових і наземних антен обчислені, для проведення розрахунків за формулою (1.2)

необхідно задати характеристики бортових і наземних антен. Точний розрахунок енергетики радіолінії припускає наявність таких самих точних виразів для діаграм спрямованості антен земних станцій і бортових ретрансляторів. У тому випадку, коли це не є можливим, можуть бути рекомендовані прийняті у Звіті 391-5 МККР такі моделі [2, 3]:

1 Для антен земних станцій при роботі на частотах від 2 до 30 ГГц діаграми спрямованості можуть бути подані виразами:

а) для антен з  $(D/\lambda) > 100$

$$G(\varphi) = \begin{cases} G_{\max} - 2,5 \cdot 10^{-3} \left( D \cdot \varphi / \lambda \right)^2 & \text{при } 0 \leq \varphi < \varphi_m; \\ G_1 & \text{при } \varphi_m \leq \varphi < \varphi_r; \\ 32 - 25 \lg \varphi & \text{при } \varphi_r \leq \varphi < 48^\circ; \\ -10 & \text{при } 48 \leq \varphi \leq 180^\circ, \end{cases} \quad (1.17)$$

де  $D$  – діаметр антени, м;

$\lambda$  – довжина хвилі, м;

$$G_1 = 2 + 15 \lg D/\lambda ; \quad (1.18)$$

$G_1$  – підсилення в першій бічній пелюстці;

$$\varphi_m = (20 \lambda / D) \sqrt{(G_{\max} - G_1)} ; \quad (1.19)$$

$$\varphi_r = 15,85 \left( D/\lambda \right)^{-0,6} ; \quad (1.20)$$

б) для антен з  $D/\lambda < 100$

$$G(\varphi) = \begin{cases} G_{\max} - 2,5 \cdot 10^{-3} \left( D \varphi / \lambda \right)^2 & \text{при } 0 \leq \varphi < \varphi_m; \\ G_1 & \text{при } \varphi_m \leq \varphi < 100 \left( \lambda / D \right); \\ 52 - 10 \lg \left( D/\lambda \right) - 25 \lg \varphi & \text{при } 100 \left( \lambda / D \right) \leq \varphi < 48^\circ; \\ 10 - 10 \lg \left( D/\lambda \right) & \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ, \end{cases} \quad (1.21)$$

де  $G_1$  і  $\varphi_m$  визначаються відповідно за формулами (1.18) і (1.19).

У формулах (1.17) і (1.21) значення  $G_{\max}$  або задаються на підставі даних вимірювань, або, для параболічних антен, розраховуються відповідно до виразів [4]

$$G_{\max} = 10 \lg \left\{ \pi^2 \nu \left( \frac{D}{\lambda} \right)^2 \left[ 1 - 16 \pi^2 \left( \frac{\sigma}{\lambda} \right)^2 \right] \right\}, \quad (1.22)$$

або

$$G_{\max} = 10 \lg \left\{ \pi^2 \nu \left( \frac{D}{\lambda} \right)^2 \left[ 1 - 16 \pi^2 k^2 \left( \frac{D}{\lambda} \right)^2 \right] \right\}, \quad (1.23)$$

де  $\nu$  – коефіцієнт використання площі розкриття антени;

$k$  – відносна точність виготовлення антени, визначувана відношенням  $\sigma/D$ , яка звичайно не перевищує  $10^{-4} \dots 10^{-5}$ ;

$\sigma$  – середньоквадратичне відхилення реальної поверхні від розрахованої.

Якщо про точність виготовлення антени не відомо, то вважають  $\nu=1$  і  $k=0$ .

2 Для бортових антен може бути використана довідкова діаграма, яка подана у Звіті 558-3 МККР [2]:

$$G(\varphi) = \begin{cases} G_m - 3 \left( \frac{\varphi}{\varphi_0} \right)^2 & \text{при } 0^\circ \leq \varphi \leq a \varphi_0; \\ G_m + L_s & \text{при } a \varphi_0 < \varphi \leq b \varphi_0; \\ G_m + L_s + 20 - 25 \lg \left( \frac{\varphi}{\varphi_0} \right) & \text{при } b \varphi_0 < \varphi \leq \varphi_1; \\ 0 & \text{при } \varphi_1 < \varphi, \end{cases} \quad (1.24)$$

де  $G_m$  – максимальне посилення антени, дБ;

$\varphi_0$  – половина ширини головного променя ДС, град (якщо осі еліпса перетину головного променя ДС на рівні -3 дБ не рівні між собою  $\alpha \neq \beta$ , то  $\varphi_0 \approx \frac{\alpha + \beta}{4}$ );

$\varphi_1$  – значення  $\varphi$ , при якому третій вираз у системі рівнянь (1.21) перетворюється на нуль,

$$\varphi_1 = 10^{0,04(G_m + L_s + 20 + 25 \lg \varphi_0)}; \quad (1.25)$$

$L_s$  – рівень ближньої бічної пелюстки ДС, дБ, щодо максимального випромінювання в головній пелюстці ДС.

Значення  $L_s$ ,  $a$  і  $b$  задані в таблиці 1.1.

Таблиця 1.1 Відповідність параметрів рівню бічних пелюсток

$L_s$	$a$	$B$
-20	2,58	6,32
-25	2,88	6,32
-30	3,16	6,32

Максимальне посилення антени бортової станції залежить від розмірів зони обслуговування і визначається формулою [1, 2]

$$G_m = 44,44 - 10 \lg \alpha - 10 \lg \beta, \quad (1.26)$$

де  $\alpha$  і  $\beta$  осі еліпса перетину головного променя ДС на рівні -3 дБ, виражені в градусах .

#### **1.1.4 Розрахунок ослаблення сигналу за рахунок поглинання енергії радіохвиль в атмосфері**

Ослаблення в атмосфері радіохвиля зазнає за рахунок поглинання в газах і водяній парі, а також унаслідок розсіяння і поглинання енергії в дощі. Нижче наведено розрахункові співвідношення, що дозволяють оцінити ослаблення сигналу як в умовах "ясного неба", так і за наявності дощу.

##### **1.1.4.1 Розрахунок ослаблення сигналу за рахунок поглинання енергії радіохвиль у газах атмосфери і водяній парі**

В умовах "ясного неба" основне поглинання викликають кисень і водяна пара. У звіті 719-1 МККР [2] величина ослаблення сигналу в газах атмосфери визначається виразом



$$Aa_0 = \begin{cases} (h_{O_2} \gamma_{O_2} + h_{H_2O} \cdot \gamma_{H_2O}) / \sin \theta & \text{при } \theta > 10; \\ \sqrt{R_{33}} \cos \theta [\gamma_{O_2} \cdot \sqrt{h_{O_2}} \cdot F_{O_2} + \gamma_{H_2O} \sqrt{h_{H_2O}} \cdot F_{H_2O}] & \text{при } 0 < \theta \leq 10^\circ, \end{cases} \quad (1.27)$$

де  $\theta$  – кут місця земної станції, град, який обчислюється за формулою, аналогічно виразу (1.13) з використанням виразу (1.5),

$$\theta = \arccos \left( \frac{d^2 + R_3^2 - (H + R_3)^2}{2dR_3} \right) - 90^\circ; \quad (1.28)$$

$R_{33}$  – еквівалентний радіус Землі ( $R_{33}=8500$  км), км;

$\gamma_{O_2}$  і  $\gamma_{H_2O}$  – відповідно погонне ослаблення в кисні і водяній парі, дБ/км, залежне від частоти, визначувані за графіками, наведеними на рисунках 1.3 і 1.4, що помножується на коефіцієнт  $\rho=7,5$  г/м<sup>2</sup> ( $\rho$  – концентрація водяної пари);

$h_{O_2}$  і  $h_{H_2O}$  – відповідно еквівалентна висота кисню і водяної пари, км,

$$h_{O_2} = \begin{cases} 6 & \text{при } f < 50 \text{ ГГц}; \\ 6 + \frac{60}{[1 + (f - 118,7)^2]} & \text{при } 70 < f < 370 \text{ ГГц}; \end{cases} \quad (1.29)$$

$$h_{H_2O} = 2,2 + 3/[3 + (f - 22,3)^2] + 0,3/[1 + (f - 118,3)^2] + 1/[1 + (f - 323,8)^2] \quad \text{при } f < 350 \text{ ГГц}; \quad (1.30)$$

$f$  – частота коливань радіохвилі, ГГц.

$$F_{O_2} = \left[ 0,661 \text{tg} \theta \cdot \sqrt{R_{33}/h_{O_2}} + 0,339 \sqrt{\left( \text{tg} \theta \sqrt{R_{33}/h_{O_2}} \right)^2 + 5,51} \right]^{-1}; \quad (1.31)$$

$$F_{H_2O} = \left[ 0,661 \text{tg} \theta \cdot \sqrt{R_{33}/h_{H_2O}} + 0,339 \sqrt{\left( \text{tg} \theta \sqrt{R_{33}/h_{H_2O}} \right)^2 + 5,51} \right]^{-1}. \quad (1.32)$$

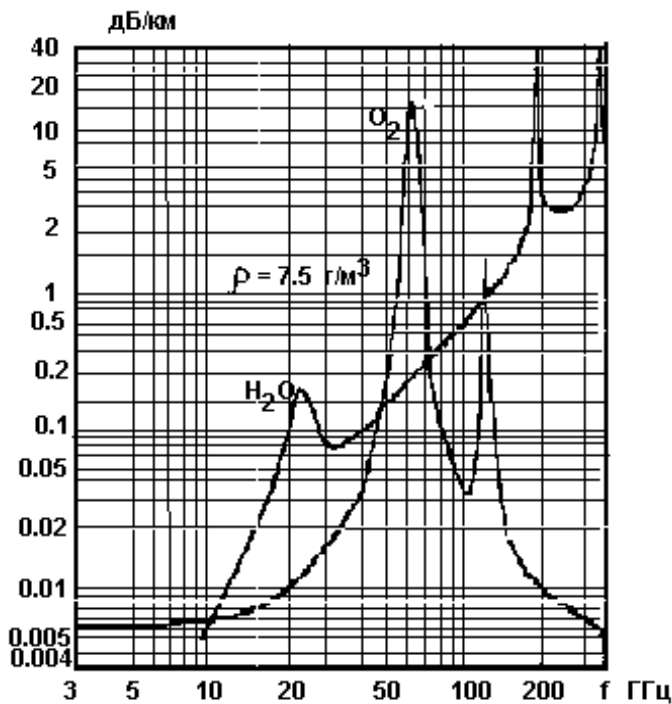


Рисунок 1.3 – Залежність ослаблення рівня сигналу від частоти при  $\rho = 7,5 \text{ г/м}^3$

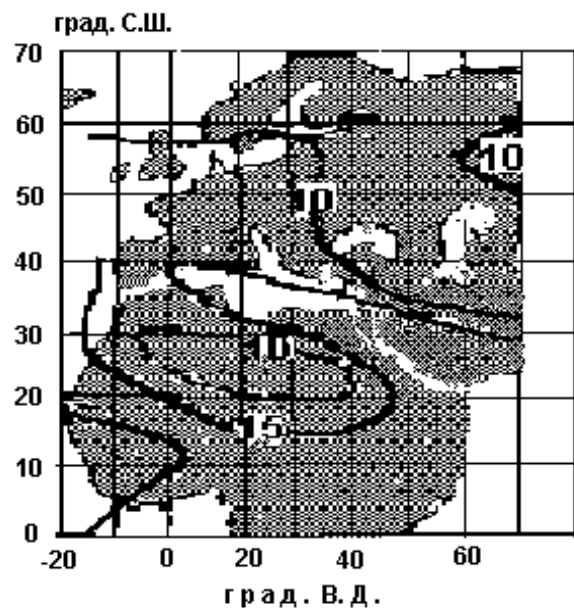


Рисунок 1.4 – Середньомісячні погонні значення концентрації водяної пари в серпні в Європі

Якщо враховувати тільки втрати в кисні, ослаблення сигналу визначатиметься виразом

$$Aa_0 = \begin{cases} \sqrt{R_{33}} \cos \theta [\gamma_{O_2} \sqrt{h_{O_2}} F_{O_2}] & \text{при } 0 < \theta \leq 10^\circ; \\ h_{O_2} \gamma_{O_2} / \sin \theta & \text{при } \theta > 10^\circ \end{cases} \quad (1.33)$$

#### 1.1.4.2 Розрахунок ослаблення сигналу, викликаного дощем

Інтенсивність розсіювання і поглинання енергії радіохвилі в дощі залежить від кількості частинок в одиниці об'єму, відношення розмірів цих частинок до довжини хвилі, розмірів області, зайнятої частинками, і їх електричних властивостей, залежних від температури. Кількість частинок в одиниці об'єму і їх розміри характеризуються інтенсивністю дощу  $I_m$ , мм/год,

залежного від кліматичного району розташування наземної станції.

У звіті 564-2 МККР [2] запропоновано такий метод розрахунку ослаблення сигналу в дощі:

1) визначається висота нульової ізотерми, км, залежно від широти станції за формулою

$$h_F = 5,1 - 2,15 \lg \left( 1 + 10^{\frac{(|\varphi| - 27)}{25}} \right), \quad (1.34)$$

де  $\varphi$  – широта земної станції, град;

2) визначається висота дощу, км, за формулою

$$h_\delta = \begin{cases} 0,6h_F & \text{при } 0^\circ \leq |\varphi| < 20^\circ; \\ [0,6 + 0,02(|\varphi| - 20)]h_F & \text{при } 20^\circ \leq |\varphi| < 40^\circ; \\ h_F & \text{при } |\varphi| > 40^\circ; \end{cases} \quad (1.35)$$

3) визначається довжина шляху сигналу, км, по похилій трасі від станції до висоти дощу, км:

$$d_\delta = \frac{2(h_\delta - h_0)}{\left[ \sin^2 \theta + 2(h_\delta - h_0) / R_{33} \right]^{1/2} + \sin \theta}, \quad (1.36)$$

де  $h_0$  – висота станції над рівнем моря;

$\theta$  – кут місця антени, обчислений за формулою (1.28);

4) чинник зменшення, що враховує нерівномірність дощу для 0,01 % часу:

$$r_{0,01} = \frac{90}{90 + 4d_\delta \cos \theta}. \quad (1.37)$$

5) за належністю станції до певної кліматичної зони (див. рисунок 1.5) з використанням таблиці 1.2 (Звіт 563-2 МККР) визначається середньорічна інтенсивність дощу  $I_m$ , мм/год, перевищувана в 0,01 % часу.

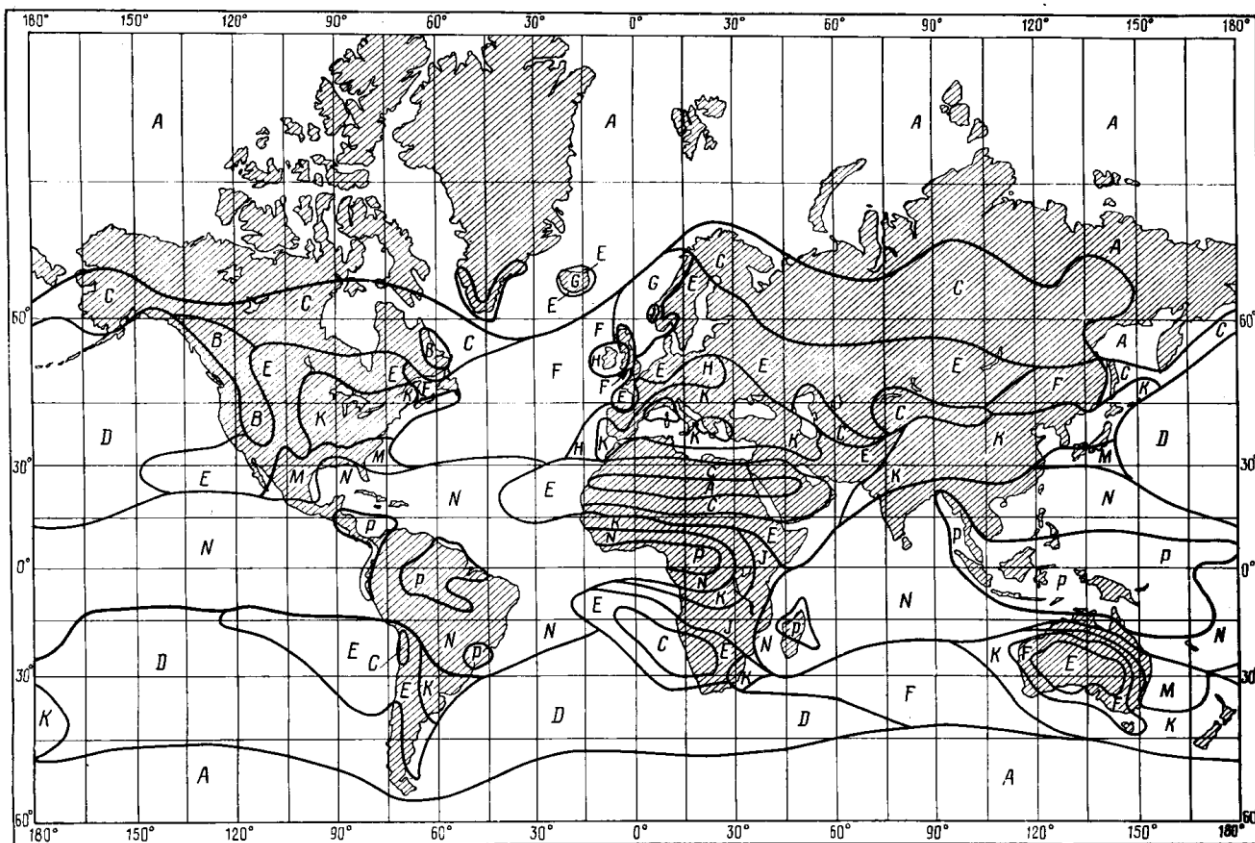


Рисунок 1.5 – Дощові кліматичні райони на карті світу

Залежності  $\gamma_{\partial}$ , дБ/км, від  $I_{\partial}$ , показані на рисунку 1.6, у діапазоні частот 9...30 ГГц можуть бути цілком задовільно апроксимовані степеневою залежністю [5]

$$\gamma_{\partial} = \beta_{\partial} I_{\partial}^{\alpha_{\partial}}, \quad (1.38)$$

де коефіцієнти  $\alpha_{\partial}$  і  $\beta_{\partial}$  є функціями від частоти:

$$\begin{aligned} \alpha_{\partial} &= 1,47 - 0,09\sqrt{f}; \\ \beta_{\partial} &= -10^{-3} + 5,1 \cdot 10^{-5} f^{2,45}, \end{aligned} \quad (1.39)$$

а значення  $f$  виражено в гігагерцах.

Таблиця 1.2 – Інтенсивність дощу

Інтенсивність дощу, мм/ч, перевищувана у вказаному відсотку пори середнього року в кліматичних зонах від А до Р														
Відсоток часу %	A	B	C	D	E	F	G	H	I	K	L	M	N	P
1.0	-	1	-	3	1	2	-	-	-	2	-	4	5	12
0.3	1	2	3	5	3	4	7	4	13	6	7	11	15	84
0.1	2	3	5	8	6	8	12	10	20	12	15	22	35	65
0.03	5	6	9	13	12	15	20	13	28	23	33	40	65	105
0.01	8	12	15	19	22	28	30	32	35	42	60	63	95	145
0.003	14	21	26	29	41	54	45	55	45	70	105	95	140	200
0.001	22	32	42	42	70	78	65	83	55	100	150	120	180	250

б) за графіками, наведеними на рисунку 1.6, визначається погонне ослаблення сигналу в дощі  $\gamma_{\text{д}}$ , дБ/км, для даної частоти і інтенсивності дощу  $I_{\text{д}}$ ;

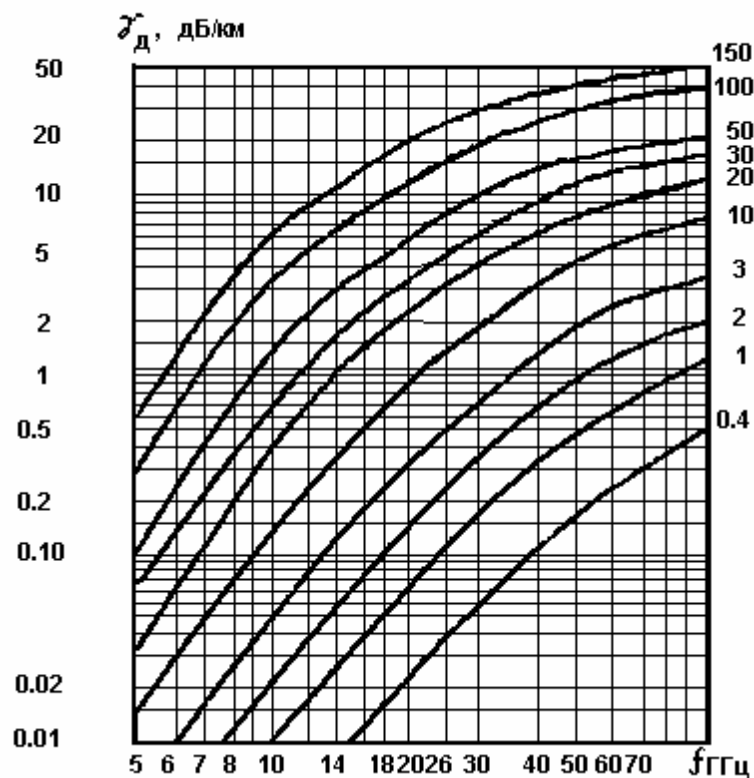


Рисунок 1.6 – Погонне ослаблення сигналу залежно від частоти сигналу та інтенсивності дощу

7) визначається ослаблення сигналу в дощі, дБ, перевищуване в 0,01 % середнього року:

$$A_{\partial 0,01} = \gamma_{\partial} \cdot d_{\partial} \cdot r_{0,01}; \quad (1.40)$$

8) якщо потрібно визначити ослаблення сигналу в дощі, перевищуване протягом  $T\%$  пори середнього року в діапазоні  $0,001 < p < 0,1$ , можна скористатися оцінкою [2]

$$A_{\partial T} = \begin{cases} A_{\partial 0,01} \left( \frac{T}{0,01} \right)^{-0,33} & \text{при } 0,001 \leq p \leq 0,01; \\ A_{\partial 0,01} \left( \frac{T}{0,01} \right)^{-0,41} & \text{при } 0,01 < p \leq 0,1. \end{cases} \quad (1.41)$$

Якщо вимоги до надійності задаються у відсотках часу гіршого місяця  $T_m$ , то при розрахунку значення  $T$  у виразі (1.41) можна скористатися наближеним співвідношенням [2]

$$T = 0,29 T_m^{1,15}. \quad (1.41a)$$

При визначенні втрат передачі для корисного сигналу необхідно враховувати якнайгірший випадок, коли втрати максимальні і перевищуються протягом  $T\%$  часу

$$L_{\partial on} = Aa_0 + A_{\partial}(T), \quad (1.42)$$

де  $Aa_0$  визначається формулою (1.27), а  $A_{\partial}(T)$  визначається формулами (1.40) і (1.41).

## 1.2 Розрахунок відношення сигнал/шум на вході бортового приймача

Для розрахунку відношення сигнал/шум на вході бортового приймача скористаємося формулою

$$g_{ВХ.Б} = P_{ВХ.Б} - 10 \lg(k T_{ШБ} \Delta F_{С.ЭФФ})$$

або

$$g_{ВХ.Б} = P_{ВХ.Б} - 10 \lg T_{ШБ} - 10 \lg \Delta F_{С.ЭФФ} - 228,6, \quad (1.43)$$

де  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  дж/град – постійна Больцмана;

$T_{ШБ}$  – шумова температура,  $K^\circ$ , приведена до входу бортового приймача;

$\Delta F_{С.ЭФФ}$  – смуга частот, яка узгоджена з шириною спектра випромінюючого сигналу,

$$\Delta F_{С.ЭФФ} = \frac{1}{T_C}; \quad (1.44)$$

$T_C$  – тривалість сигналу, який був випромінений.

Якщо  $P_{ПД.Б}$  і  $T_{ШБ}$  в явному вигляді не задані, їх значення можуть бути визначені через узагальнені показники бортового ретранслятора:

– еквівалентну ізотропну випромінювану потужність (ЕІВП) у напрямі максимуму ДС бортової антени:

$$ЕІВП_{Б.МАКС} = P_{ПД.Б} + G_{ПД.Б}(0) - b_{ПД.Б}, \quad (1.45)$$

– добротність приймальної системи ретранслятора в напрямі максимуму ДС бортової антени

$$\left( \frac{G_{ПР.Б}(0)}{T_{ШБ}} \right)_{дБ} = G_{ПР.Б}(0) - b_{ПР.Б} - T_{ШБ}; \quad (1.46)$$

– осі  $\alpha^\circ \times \beta^\circ$  еліпса перетину головного променя ДС бортової антени на рівні -3 дБ.

Враховуючи, що для бортового ретранслятора ДС на передачу і на приймання, як правило, співпадають (оскільки співпадають відповідні зони обслуговування), із співвідношень (1.45) і (1.26) випливає

$$P_{ПД.Б} = ЕІВП_{Б.МАКС} + b_{ПД.Б} - 44,44 + 10 \lg \alpha + 10 \lg \beta, \quad (1.47)$$

а з виразів (1.46) і (1.26) одержуємо

$$T_{ШБ} = 44,44 - 10 \lg \alpha - 10 \lg \beta - b_{ПР.Б} - \left( \frac{G_{ПР.Б}(0)}{T_{ШБ}} \right)_{дБ}. \quad (1.48)$$

Таким чином, на підставі виразів (1.4) і (1.43) маємо

$$g_{ВХ.Б} = P_{ПД.ЗС} + G_{ПД.ЗС}(\Delta\gamma) - b_{ПД.ЗС} - 20 \lg \left( \frac{4\pi d}{\lambda_p} \right) + G_{ПР.Б}(\Delta\Omega) - b_{ПР.Б} - A_{a0} - A_{\partial}(T) - 10 \lg T_{ШБ} - 10 \lg \Delta F_{С.ЭФФ} - 228,6 \quad (1.49)$$

або, з урахуванням виразу (1.48),

$$g_{ВХ.Б} = P_{ПД.ЗС} + G_{ПД.ЗС}(\Delta\gamma) - b_{ПД.ЗС} - 20 \lg \left( \frac{4\pi d}{\lambda_p} \right) + G_{ПР.Б}(\Delta\Omega) - A_{a0} - A_{\partial}(T) - 44,44 + 10 \lg \alpha + 10 \lg \beta + \left( \frac{G_{ПР.Б}(0)}{T_{ШБ}} \right)_{дБ} - 10 \lg \Delta F_{С.ЭФФ} - 228,6. \quad (1.50)$$

При обчисленнях за формулами (1.49) і (1.50) необхідно мати на увазі, що всі доданки виражені в децибелах,  $\lambda_p$  відповідає робочій довжині хвилі на передачу, а при виконанні проміжних обчислень (знаходження  $d$ ,  $r_{\psi}$ ,  $\theta$ ,  $\Delta\Omega$ ,  $A_{a0}$ ,  $A_{\partial}(T)$  і т. д.) під  $\varphi$  і  $\psi$  слід розуміти географічні координати передавальної станції супутникового зв'язку і враховувати, до якого кліматичного району дана станція належить.

### 1.3 Розрахунок потужності сигналу на вході приймача земної станції

Розрахунок потужності сигналу на вході приймача земної станції практично аналогічний розрахунку потужності сигналу на вході бортового приймача і виконується відповідно до виразу

$$P_{ВХ.ЗС} = P_{ПД.Б}^* + G_{ПД.Б}(\Delta\Omega) - b_{ПД.Б} + G_{ПР.ЗС}(\Delta\gamma) - b_{ПР.ЗС} - 20 \lg \left( \frac{4\pi d}{\lambda_p} \right) - A_{a0} - A_{\partial}(T), \quad (1.51)$$



де  $P_{ПД.Б}^*$  – потужність бортового передавача, що ефективно використовується для передачі корисних сигналів, дБВт,

$$P_{ПД.Б}^* = 10 \lg [ P_{ПД.Б} \eta_{ПД.Б} (1 - \alpha_{НЕЛ}) ] ; \quad (1.52)$$

$P_{ПД.Б}$  – потужність передавача бортового ретранслятора, Вт, визначувана режимом його роботи (насичення, зниження потужності на  $X$  дБ);

$G_{ПД.Б}(\Delta\Omega)$  – коефіцієнт направленої дії передавальної антени бортового ретранслятора в напрямі на приймальну ЗС, дБ, залежний від величини осей еліпса перетину діаграми спрямованості  $\alpha^\circ \times \beta^\circ$  на рівні -3 дБ і форми ДС антени;

$\Delta\Omega$  – кут між напрямом орієнтації передавальної антени супутника і напрямом на земну станцію, залежний від географічних широти  $\varphi$  і довготи  $\psi$  земної станції супутникового зв'язку, параметрів орбіти (висоти  $H$  і координат підсупутникової точки  $\varphi_n$  і  $\psi_n$ ), а також координат точки прицілювання бортової антени супутника-ретранслятора  $\varphi_\psi$  і  $\psi_\psi$ ;

$b_{ПД.Б}$  – втрати в передавальному фідері бортового ретранслятора, дБ;

$G_{ПР.ЗС}(\Delta\gamma)$  – коефіцієнт направленої дії приймальної антени земної станції в напрямі на супутник-ретранслятор, дБ, залежний від діаметра дзеркала  $D_{А.ЗС}$  антени ЗС, коефіцієнта використання площі розкриття антени  $\nu$ , відносної точності виготовлення антени  $k$  і робочої довжини хвилі;

$\Delta\gamma$  – кут між напрямом максимуму ДН антени ЗС і напрямом на супутник, що характеризує помилку наведення антени;

$b_{ПР.ЗС}$  – втрати в приймальному фідері ЗС, дБ;

$d$  – відстань між земною станцією і супутником;

$\lambda_P$  – робоча довжина хвилі;

$A_{ao}$  – втрати в атмосфері (у кисні і водяній парі), дБ;

$A_\delta(T)$  – втрати в дощі, дБ, перевищувани протягом  $T\%$  часу;

$\eta_{ПД.Б}$  – ККД передавача бортового ретранслятора;

$\alpha_{НЕЛ}$  – частка продуктів нелінійних спотворень, визначувана режимом роботи ретранслятора і розстановкою частот у смузі ствола.

При обчисленнях за формулою (1.49) необхідно мати на увазі, що всі доданки виражені в децибелах,  $\lambda_p$  відповідає робочій довжині хвилі на приймання (для ЗС), а при виконанні проміжних обчислень (знаходження  $d$ ,  $r_{\psi}$ ,  $\theta$ ,  $\Delta\Omega$ ,  $A_{a\theta}$ ,  $A_d(T)$  і т. д.) під  $\varphi$  і  $\psi$  слід розуміти географічні координати приймальної станції супутникового зв'язку і враховувати, до якого кліматичного району дана станція належить.

У виразі (1.52) невизначеними залишилися значення  $\eta_{ПД.Б}$  і  $\alpha_{НЕЛ}$ . Нижче дані параметри довизначаються.

### 1.3.1 Коефіцієнт корисної дії передавача бортового ретранслятора

Значення ККД передавача бортового ретранслятора,  $\delta Б$ , визначається потужністю шумів у смузі ствола і сумарною потужністю корисних сигналів, що поступає на вхід ствола:

$$\eta_{ПД.Б} = 10 \lg \left[ \frac{\sum_{i=1}^N P_{ВХ.Бi}}{\sum_{i=1}^N P_{ВХ.Бi} + P_{Ш.СТВ}} \right], \quad (1.53)$$

де  $P_{ВХ.Бi}$  – потужність  $i$ -го сигналу на вході приймача бортового ретранслятора від  $i$ -ї ЗС, розрахована за формулою (1.4), Вт,

$$P_{ВХ.Бi} (Вт) = 10^{0,1 P_{ВХ.Бi} (\delta БВт)}; \quad (1.54)$$

$P_{Ш.СТВ}$  – потужність шумів, Вт, у смузі ствола бортового ретранслятора

$$P_{Ш.СТВ} = k T_{ШБ} \Delta F_{СТВ}; \quad (1.55)$$

$k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  дж/град – постійна Больцмана;

$T_{ШБ}$  – шумова температура,  $K^\circ$ , приведена до входу бортового приймача;

$\Delta F_{СТВ}$  – ширина смуги пропускання ствола бортового ретранслятора, Гц, що є одним з його параметрів.

### 1.3.2 Розрахунок потужності бортового передавача, що ефективно використовується

Якщо весь ствол бортового ретранслятора використовується для передачі одного цифрового потоку, то потужність бортового передавача, що ефективно використовується, дБВт, визначається виразом

$$P^*_{ПД.Б} = P_{ПД.Б} + \eta_{ПД.Б}, \quad (1.56)$$

де  $\eta_{ПД.Б}$  обчислюється за формулами (1.4), (1.54) і (1.53) при  $i=1$  ( $N=1$ ).

Якщо ж через ствол бортового ретранслятора передаються  $N$  рівнопотужних сигналів, то частина потужності передавача витрачається на передачу продуктів нелінійних спотворень. Рівень цих спотворень залежить від режиму роботи ретранслятора. У роботі [1] показано, що в режимі граничного обмеження ("насичення") частка продуктів нелінійних перетворень складає  $\alpha_{НАС.1} = 0,215$ , а у разі «м'якого» обмеження зі зниженням потужності бортового передавача на 3дБ  $\alpha_{НАС.2} = 0,0136$ . При цьому ефективно перевипромінювана потужність однієї ЗС, дБВт, визначається виразом

$$P^*_{ПД.Б} = P_{ПД.Б} + \eta_{ПД.Б} + 10 \lg(1 - \alpha_{НЕЛ}) - 10 \lg N, \quad (1.57)$$

де всі доданки визначено раніше.

## 1.4 Розрахунок відношення сигнал/шум на трасі «борт-земля»

Для розрахунку відношення сигнал/шум, дБ, на вході приймача ЗС, скористаємося формулою

$$g_{ВХ.ЗС} = P_{ВХ.ЗС} - P_{\Sigma Ш.ЗС}, \quad (1.58)$$

або

$$g_{ВХ.ЗС} = P_{ПД.Б} + G_{ПД.Б}(\Delta\Omega) - b_{ПД.Б} + \eta_{ПД.Б} + 10 \lg(1 - \alpha_{НЕЛ}) - 10 \lg N + \\ + G_{ПР.ЗС}(\Delta\gamma) - b_{ПР.ЗС} - 20 \lg \left( \frac{4\pi d}{\lambda_p} \right) - A_{a_0} - A_{\delta}(T) - P_{\Sigma Ш.ЗС}, \quad (1.59)$$

де  $P_{\Sigma Ш.ЗС}$  – сумарна потужність шумів, дБВт, що приведена до входу приймача ЗС,

$$P_{\Sigma Ш.ЗС} = 10 \lg(P_{Ш.ЗС} + P_{Ш.ПЕРЕИЗЛ} + P_{Ш.НЕЛ}); \quad (1.60)$$

$P_{Ш.ЗС}$  – потужність шумів, Вт, що приведена до входу приймача ЗС [2],

$$P_{Ш.ЗС} = k T_{ШЗС} \Delta F_{С.ЭФФ}, \quad (1.61)$$

де  $k = 1,38 \cdot 10^{-23}$  дж/град – постійна Больцмана;

$T_{ШЗС}$  – шумова температура,  $K^{\circ}$ , приймальної системи ЗС;

$\Delta F_{С.ЭФФ}$  – смуга частот, Гц, узгоджена з шириною спектра випромінюючого сигналу (див. співвідношення (1.44)).

Шумова температура приймальної системи ЗС може бути обчислена з використанням розрахункових співвідношень, отриманих у Звіті 208-6 МККР [2]:

$$T_{ШЗС} = FT_{Поч} + \frac{(1-F)}{Aa_0 A_{\delta}(T)} [T_{ФОН} + T_{АТМ} (Aa_0 A_{\delta}(T) - 1)] + \\ + (b_{ПР.ЗС} - 1)T_{ВОЛН} + b_{ПР.ЗС} T_{МШУ}, \quad (1.62)$$

де  $T_{Поч}$  – ефективна температура,  $K$ , ґрунту навколо станції;

$T_{\text{ФОН}}$  – температура фонового випромінювання неба,  $K$ ;

$T_{\text{АТМ}}$  – ефективна температура середовища загасання (гази, хмари, дощ),  $K$ ;

$T_{\text{ВОЛН}}$  – температура хвилеводу або лінії передачі, що з'єднує затиск антени з приймачем,  $K$ ;

$T_{\text{МШУ}}$  – ефективна шумова температура приймача зі всіма подальшими каскадами, віднесена до входу приймача,  $K$ ;

$F$  – коефіцієнт посилення антени відносно ЕІВП, інтегрований по всіх компонентах спрямованості проти навколишньої поверхні землі ("коефіцієнт наземного перехоплення");

$Aa_{0_{\delta-3}}$  – коефіцієнт поглинання в дощі або інших гідрометеорах уздовж осі основного променя на трасі «борт-земля»;

$A_{\delta}(T)_{\delta-3}$  – коефіцієнт поглинання в атмосферних газах уздовж осі основного променя на трасі «борт-земля»;

$b_{\text{ПР.ЗС}}$  – коефіцієнт загасання у хвилеводі приймального тракту ЗС.

Потужність шумів, Вт, перевипромінюваних бортовим ретранслятором і потрапляючих у смугу основної селекції приймача ЗС, визначається виразом

$$P_{\text{Ш.ПЕРЕИЗЛ}} = P_{\text{ПД.Б}} (1 - \eta_{\text{ПД.Б}}) \frac{\Delta F_{\text{С.ЭФФ}}}{\Delta F_{\text{СТВ}}} L_{\Sigma\text{Б-З}}, \quad (1.63)$$

де  $P_{\text{ПД.Б}}$  – потужність передавача бортового ретранслятора, Вт, визначувана режимом його роботи (насичення, зниження потужності на  $X$  дБ);

$\eta_{\text{ПД.Б}}$  – ККД передавача бортового ретранслятора;

$\Delta F_{\text{С.ЭФФ}}$  – смуга частот, узгоджена з шириною спектра сигналу, який був випромінений, залежна від швидкості передачі інформації і виду модуляції, що використовується;

$\Delta F_{\text{СТВ}}$  – ширина смуги пропускання ствола бортового ретранслятора, Гц, що є одним з його параметрів;

$L_{\Sigma\text{Б-З}}$  – сумарні втрати на трасі «борт-земля», визначувані формулою

$$L_{\Sigma\text{Б-З}} = 10^{0,1L_{\Sigma\text{Б-З}, \text{дБ}}}, \quad (1.64)$$

де

$$L_{\Sigma Б-З, \text{дБ}} = G_{\text{ПД.Б}}(\Delta\Omega) - b_{\text{ПД.Б}} + G_{\text{ПР.ЗС}}(\Delta\gamma) - b_{\text{ПР.ЗС}} - 20 \lg \left( \frac{4\pi d}{\lambda_p} \right) - A_{\text{ао}} - A_o(T), \quad (1.65)$$

а всі змінні, що входять до виразу (1.65), визначено раніше.

Потужність шумів, що виникають за рахунок продуктів нелінійних перетворень при багатосигнальній дії на бортовий ретранслятор, що приведена до входу приймача ЗС, визначається співвідношенням

$$P_{\text{Ш.НЕЛ}} = \alpha_{\text{НЕЛ}} P_{\text{ПД.Б}} \eta_{\text{ПД.Б}} \frac{\Delta F_{\text{С.ЭФФ}}}{\Delta F_{\text{СТВ}}} L_{\Sigma Б-З}, \quad (1.66)$$

де  $\alpha_{\text{НЕЛ}}$  – частка продуктів нелінійних спотворень, визначувана режимом роботи ретранслятора і розстановкою частот в смузі ствола [3], а  $P_{\text{ПД.Б}}$  – потужність передавача бортового ретранслятора, Вт, визначувана режимом його роботи.

## 1.5 Розрахунок відношення сигнал/шум на трасі "земля-борт-земля"

Відношення сигнал/шум на трасі "земля-борт-земля" обчислюється на підставі формули (1.1)

$$g_{\Sigma ЗС} = \left[ \frac{1}{g_{\text{ВХ.Б}}} + \frac{1}{g_{\text{ВХ.ЗС}}} \right]^{-1}, \quad (1.67)$$

де

$$g_{\text{ВХ.Б}} = 10^{0,1 g_{\text{ВХ.Б,дБ}}}; \quad (1.68)$$

$$g_{\text{ВХ.ЗС}} = 10^{0,1 g_{\text{ВХ.ЗС,дБ}}}, \quad (1.69)$$

а  $g_{\text{ВХ.Б,дБ}}$  і обчислюються відповідно до виразів (1.43) і (1.58).

## **2 Початкові дані, методика і результати розрахунку енергетичного потенціалу і пропускної спроможності супутникових радіоліній і мереж**

Систему супутникового зв'язку слід розглядати не як альтернативу, а як подальший розвиток існуючої і в даний час наземної системи зв'язку, яка вдосконалюється і базується на використуванні дротових, волоконно-оптичних, радіо- і радіорелейних системах передачі. Ряд досліджень показав, що питомі витрати (вартість одного канало-кілометра) для наземної зонової комутованої телефонної мережі (ЗКТМ), що характеризується протяжністю ділянок до 200 км, у 3-5 разів менше, ніж при використуванні каналів, забезпечуваних фіксованим супутниковим зв'язком (ФСЗ). На ділянках магістральних міжміської і міжнародної мереж економічність використування каналів супутникового зв'язку істотно залежить від дальності зв'язку. Питомі витрати вважалися зіставними при протяжності магістралі 1500...3300 км.

Такий висновок не є достатньо коректним із таких причин:

1 Не враховано особливості (складність) рельєфу місцевості, на якій прокладаються наземні лінії зв'язку.

2 Не враховано реальну пропускну спроможність комутованих телефонних каналів при передачі даних.

3 Не враховано реальну пропускну спроможність комутаційних центрів при передачі даних.

4 Не враховано тенденцію переходу на цифрові телефонні канали передачі, для забезпечення яких потрібна істотно велика смуга робочих частот ліній передачі;

5 Не оцінено тимчасові показники з освоєння капіталовкладень на розвиток інформаційної інфраструктури.

6 Не враховано ряд особливостей ФСЗ, що дозволяють комплексно вирішувати завдання побудови загальнодержавних (магістральних, внутрішньозонових і місцевих) і відомчих первинних мереж:

\* фіксований супутниковий зв'язок дозволяє створювати не тільки окремі лінії зв'язку, але і забезпечувати повнодоступний зв'язок між будь-якими пунктами (у тому числі розташованими у важкодоступних районах з нерозвиненою інформаційною

інфраструктурою), що потрапляють у зону, охоплену антенною системою ретранслятора, встановленого на борту супутника;

\* ФСЗ може використовуватися не тільки як система передачі, але і як система автоматичної комутації, що дозволяє забезпечувати унікальну гнучкість і маневреність при побудові мереж зв'язку з довільною топологією;

\* системи супутникового зв'язку можуть забезпечувати прибуток від їх експлуатації вже на першому етапі їх розгортання.

Розрахунки, виконані в Росії з урахуванням (частковим) перерахованих вище особливостей ФСЗ Науково-виробничим об'єднанням прикладної механіки (НВО ПМ) у рамках системного проекту "Росія", показали економічну доцільність упровадження супутникових систем передачі (ССП) навіть для місцевих первинних мереж.

Підвищення економічної ефективності упровадження ФСЗ можна досягти за рахунок оперативної комутації основних цифрових каналів (ОЦК), первинних, вторинних і третинних цифрових мережних трактів (ПЦСТ, ВЦСТ, ТЦСТ), відповідних швидкостям 64, 2048, 8448 кбіт/с і 34 Мбіт/с, для резервування кабельних магістралей і окремих напрямів, а також за рахунок зменшення розрахункової пропускної спроможності магістралей і напрямів зв'язку при підключенні в години найбільшого навантаження каналів і трактів організованих ФСЗ.

Важко оцінити економічну ефективність використання ФСЗ при виникненні надзвичайних ситуацій (повені, землетруси, пожежі, локальні конфлікти і т. д.), оскільки в цих умовах дротові системи передачі практично не можуть нормально функціонувати, а наземні радіозасоби мають істотно більш низьку пропускну спроможність, завадостійкість і якість.

Ще більшу значущість ФСЗ має для забезпечення обороноспроможності країни і, особливо, при веденні повномасштабних бойових дій, коли вірогідний супротивник використовує всі доступні засоби радіоелектронної боротьби (РЕБ). Досвід ведення бойових дій на Близькому Сході, у Персидській затоці і Європі (Югославія) показав, що супутниковий зв'язок часто залишався єдиним можливим.



Значною мірою техніко-економічна ефективність ФСЗ залежатиме:

а) від ступеня відповідності можливостей, що надаються мережею супутникового зв'язку, потребам користувачів;

б) принципів побудови мереж, що покладені в основу їх побудови і визначають такі основні показники, як кількість обслуговуваних пунктів, розташованих у різних географічних точках, надійність функціонування, час і достовірність доставки повідомлення;

в) технічних рішень (загалом пов'язаних з принципами побудови мереж супутникового зв'язку), що визначають вартість наземного обладнання станцій супутникового зв'язку і ефективність використання космічного сегмента.

## **2.1 Основні характеристики БР КАЗ, що забезпечують можливість функціонування ЗС**

Вибір типу і режиму роботи бортового ретранслятора космічного апарату зв'язку (БР КАЗ) значною мірою визначає характеристики системи супутникового зв'язку в цілому. Розгортання ФСЗ може здійснюватися на основі:

1) національного БР КАЗ, що виводиться на геостаціонарну орбіту власною ракетою-носієм;

2) власного БР КАЗ, що виводиться на геостаціонарну орбіту ракетою-носієм однієї з космічних держав;

3) оренди частотно-енергетичного ресурсу БР КАЗ однієї (або декількох) національних або міжнародних космічних угруповань. З військово-політичної точки зору доцільною є орендувати частотно-енергетичний ресурс БР КАЗ у країн або організацій, що є політичними антиподами.

Основними показниками, за якими здійснюється вибір БР КАЗ, є:

а) точки стояння КАЗ на геостаціонарній орбіті;

б) точка прицілювання бортової антени;

в) діапазон частот передачі/приймання транспондерів, встановлених на борту КАЗ;

г) вид поляризації на передачу/приймання;

- д) характеристики бортових антен (БА);
- е) потужність бортових передавачів;
- ж) шумова температура бортових приймачів.

Узагальненим показником бортових ретрансляторів є еквівалентна ізотропно випромінювана потужність (ЕІВП) і добротність приймальної системи ( $G_6/T_6$ ), а також зона обслуговування, у межах якої забезпечується необхідне відношення сигнал/шум на вході приймальної антени земної станції супутникового зв'язку.

Дані показники повинні бути узгоджені з технічними характеристиками ЗС, а зона обслуговування повинна покривати необхідну територію.

При розміщенні ЗС в кліматичних районах, для яких характерні інтенсивні опади, доцільно будувати ФСЗ в С-діапазоні. Для цього діапазону характерним є істотно менше ослаблення в гідрометеорах, а отже, більш високий коефіцієнт готовності супутникового радіоканалу. Роботу в С-діапазоні забезпечують стволи російського БР КАЗ "Горизонт" і "Експрес", а також стволи БР КАЗ міжнародної системи Intelsat.

### **2.1.1 Основні характеристики БР КАЗ "Горизонт"**

Супутники "Горизонт" обладнані антенами, що забезпечують приймання і передачу сигналів у діапазонах С і Ku. Передавальні і приймальні антени транспондерів класифікуються за величиною розкривання діаграми спрямованості антени (у градусах). На супутнику "Горизонт" застосовуються антени з сферичною (глобальною) діаграмою спрямованості з величиною розкривання  $17^\circ \times 17^\circ$ , антени з напівсферичною (напівглобальною) діаграмою спрямованості  $9^\circ \times 18^\circ$ , із зоною діаграмою спрямованості  $6^\circ \times 12^\circ$  і променевою діаграмою спрямованості  $5^\circ \times 5^\circ$ . Наприклад, антена  $9^\circ \times 18^\circ$  має величину розкривання  $\pm 4,5^\circ$  у напрямі північ-південь і  $\pm 9^\circ$  в напрямі захід-схід.

Супутник "Горизонт" має декілька варіантів конфігурації підключення транспондерів до антен на супутнику відповідно до схеми, наведеної на рисунку 2.1.

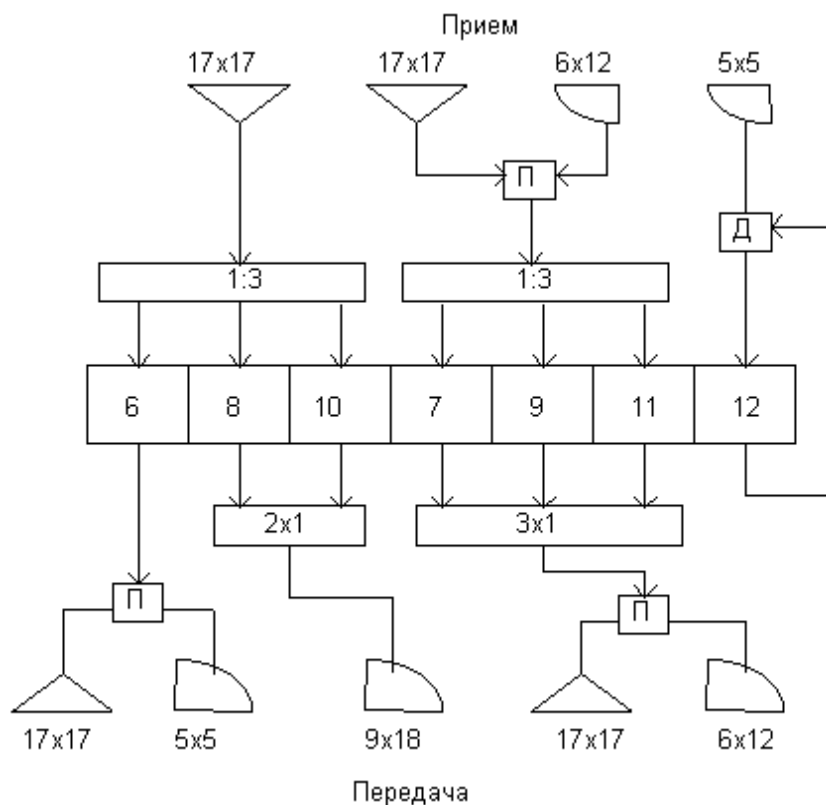


Рисунок 2.1 – Конфігурації підключення транспондерів до антен на супутнику “Горизонт”

Орбітальні позиції супутника "Горизонт" реєструються Міжнародним Союзом Електрозв'язку під індексом "Стационар" для робочих частот у діапазоні 4/6 ГГц і під індексом "Промінь" для робочих частот у діапазоні 11/14 ГГц.

Точність утримання на орбіті протягом гарантованого терміну служби:

у напрямі захід-схід не більш +/- 0,5 град

у напрямі північ-південь не більш +/- 2,0 град.

Транспондери (приймально-передавальні комплекси) супутників забезпечують приймання і передачу будь-якого виду інформації (телебачення, радіомовлення, передача газетних смуг, телефонні, телеграфні і факс-повідомлення, відеоконференцзв'язок та ін.) у межах зони обслуговування при використуванні різних типів земних станцій. У таблиці 2.1 наведено необхідні для проведення розрахунків значення основних енергетичних параметрів транспондерів ІСЗ “Горизонт”: значення ЕІВП насичення, добротність транспондерів (G/T) у центрі променя, значення коефіцієнта посилення антен. Коефіцієнт посилення всіх транспондерів регулюється в межах 105-125 дБ.

Таблиця 2.1 – Основні характеристики стволів БР КАЗ "Горизонт" з точками стояння 14°зд, 11°зд, 40°сд, 53°сд, 80°сд, 90°сд, 96.5°сд, 103°сд, 140°сд, 145°сд

Ствол	Сер.частота МГц		$\Delta f$ , МГц	ДС, град (варіант) $\alpha^\circ \times \beta^\circ$		ЕІВП	G/T, дБ/К	Рпдб, Вт	Тшб ДО°
	ПРД	ПРМ		ПРД	ПРМ				
						у центрі зони обслуговування, дБ			
6	3675	6000	40	5 × 5	17×17	46,5	-13	80	2500
7	3725	6050	34	6 × 12	6×12	34,5	-8	15	2500
8	3775	6100	34	9 × 18	17×17	29,5	-13	15	2500
9	3825	6150	34	6 × 12	6×12	34,5	-8	15	2500
10	3875	6200	34	9 × 18	17×17	29,5	-13	15	2500
11	3925	6250	34	6 × 12	6×12	34,5	-8	15	2500
12	14325	11525	34	5 × 5	5 × 5	38,5	-5	20	2500

При багатосигнальному режимі роботи зниження потужності на виході БР КАЗ щодо максимального значення складає 6дБ.

Точки прицілювання бортових антен задаються для кожного БР КАЗ індивідуально і можуть змінюватися в міру необхідності в невеликих межах. Як приклад, у таблиці 2.2 наведено дані про точки прицілювання бортових антен різних стволів БР КАЗ "Горизонт" з точкою стояння 53 сд.

Таблиця 2.2 – Точки прицілювання бортових антен БР КАЗ "Горизонт" з точкою стояння 53 сд

Точка прицілювання		Ствол			
		6	7, 9, 11	8, 10	12
На передачу	Північна широта	57,1	45,0	26,82	44,0
	Східна довгота	57,5	53,0	53,0	38,8
На приймання	Північна широта	0	45,0	0	44,0
	Східна довгота	53,0	53,0	53,0	38,8

Зона обслуговування визначається контуром посилення мінус 2,7 дБ для сферичної і контуром мінус 3 дБ для напівсферичної діаграми спрямованості бортової антени. При цьому кут місця антени земної станції в зоні обслуговування

повинен бути не менше  $5^\circ$ . Як приклад, на рисунку 2.2 наведено контури рівного посилення транспондера ІСЗ "Горизонт" з точкою стояння 53 сд.

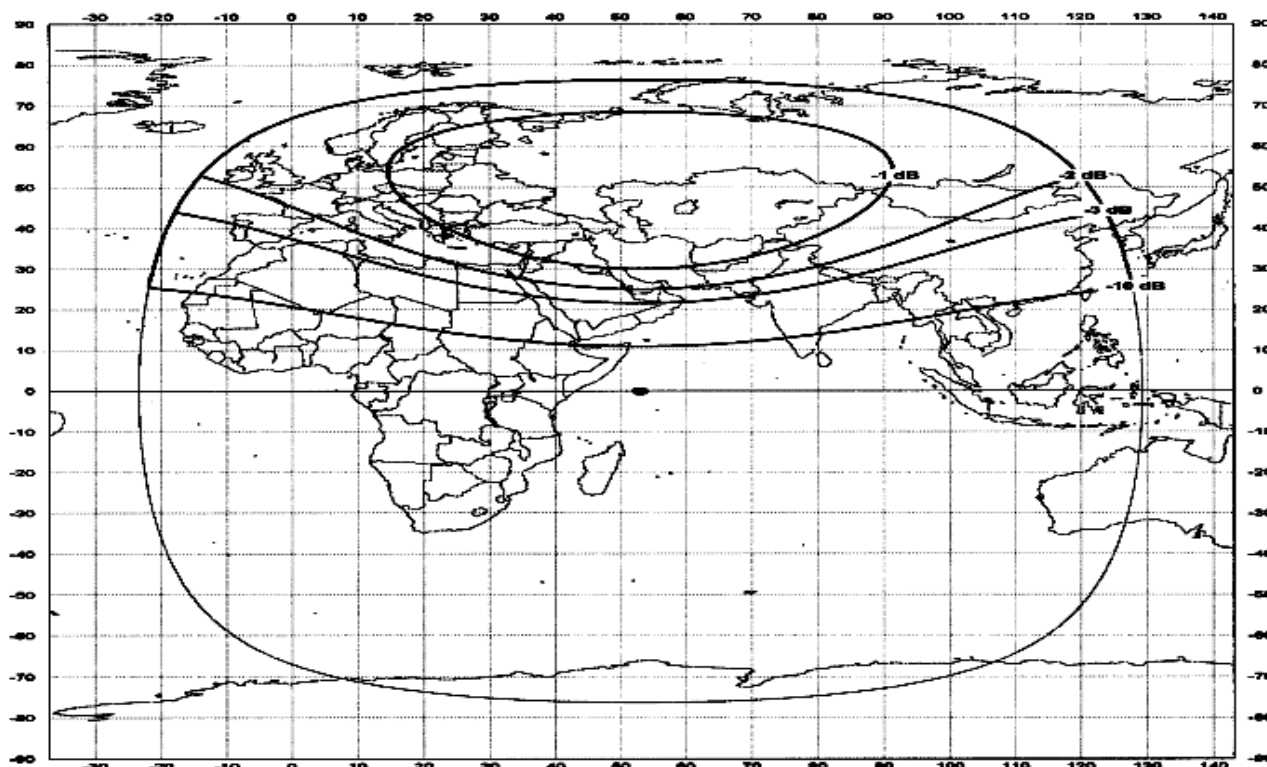


Рисунок 2.2 – Конттури рівного посилення на передачу транспондерів № 7, 9, 11 ІСЗ "Горизонт" з точкою стояння 53 сд

На рисунку 2.3 наведено контури рівного посилення на приймання транспондерів № 7, 9, 11 ІСЗ "Горизонт" з точкою стояння 53 сд.

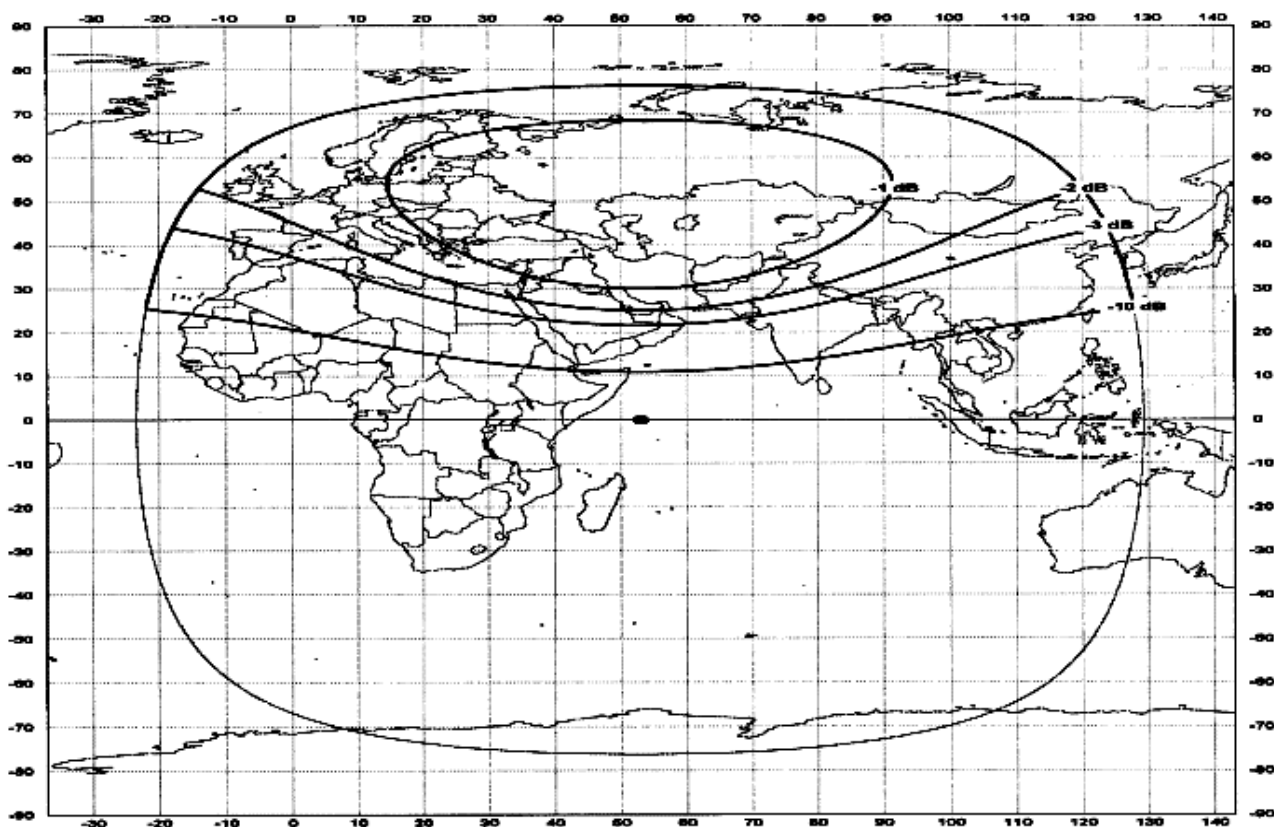


Рисунок 2.3 – Контури рівного посилення на приймання транспондерів № 7, 9, 11 ІСЗ "Горизонт" з точкою стояння 53 сд

### 2.1.2 Основні характеристики БР КАЗ "Експрес"

Супутники "Експрес" обладнані антенами і транспондерами, які забезпечують приймання і передачу сигналів у С діапазоні. Передавальні і приймальні антени транспондерів позначаються величиною розкриття діаграми спрямованості антени в градусах.

Точність утримання супутників на орбіті протягом гарантованого терміну служби:

- у напрямі захід-схід не більше +/- 0,2 град;
- у напрямі північ-південь не більше +/- 0,2 град.

Поляризація сигналу на частотах приймання (6 ГГц) - кругова, лівого обертання, а на частотах передачі (4 ГГц) - кругова, правого обертання.

Типи й основні характеристики антен, що використовуються на супутнику "Експрес", подано в таблиці 2.3.

Таблиця 2.3 – Типи антен, що використовуються на супутнику "Експрес"

Тип	ДС ( $\alpha^\circ \times \beta^\circ$ )	Характеристики й особливості антен
A1	17×17	Глобальна антена, орієнтована в підсупутникову точку
A2	5×5	Зонова антена, яка має можливість перенацілювання в процесі експлуатації осі головної пелюстки ДС антени в межах 8° в напрямі Північ, у межах 4° в напрямі Південь і $\pm 7^\circ$ в напрямі Захід-Схід щодо точки прицілювання *
A3	15×15	Квазіглобальна антена, орієнтована в підсупутникову точку
A4	5×11	Зонова антена, яка має можливість перенацілювання в процесі експлуатації осі головної пелюстки ДС антени в межах $\pm 8^\circ$ в напрямі Північ-Південь і $\pm 8^\circ$ в напрямі Захід-Схід щодо точки прицілювання *
A5	15×15	Квазіглобальна антена, орієнтована в підсупутникову точку
A6	5×11	Зонова антена, яка націлюється в заводських умовах в задану точку
A7	17×17	Глобальна антена, орієнтована в підсупутникову точку
A8	5×11	Зонова антена, яка націлюється в заводських умовах в задану точку
*Діапазон перенацілювання антен наведено в кутках КА.		

Супутник "Експрес" має декілька варіантів конфігурації підключення транспондерів до антен на супутнику відповідно до схеми, наведеної на рисунку 2.4. Точки прицілювання бортових антен задаються для кожного БР КАЗ індивідуально і можуть змінюватися в міру необхідності у вказаних у таблиці 2.3 межах.

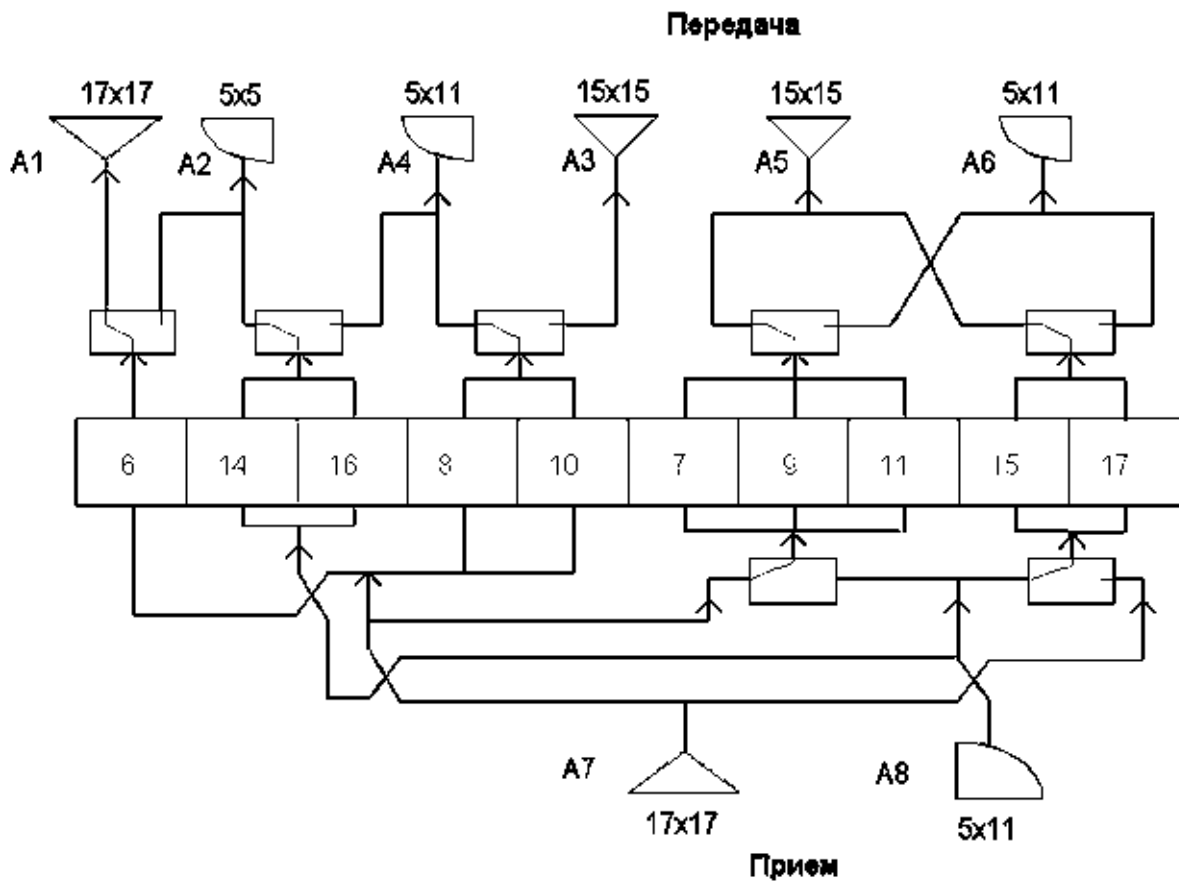


Рисунок 2.4 – Конфігурації підключення транспондерів до антен на супутнику "Експрес"

Основні параметри стволів БР КАЗ "Експрес", необхідні для виконання енергетичних розрахунків супутникових радіоліній і мереж при використуванні різних конфігурацій транспондерів і бортових антен, наведено в таблиці 2.4.

Таблиця 2.4 – Основні характеристики стволів БР КАЗ "Експрес" з точками стояння 14°зд, 11°зд, 40°сд, 53°сд, 80°сд, 90°сд, 96,5°сд, 103°сд, 140°сд, 145°сд

Ствол	Сер. частота МГц		$\Delta f$ , МГц	ДС, град (варіант) $\alpha^\circ \times \beta^\circ$		ЕІВП	G/T, дБ/К	Рпдб, Вт	Тшб ДО°
	ПРД	ПРМ		ПРД	ПРМ				
						у центрі зони бслуговування, дБ			
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
6	3675	6000	40	17×17(A1) 5 ×5(A2)	17×17(A7) 17×17(A7)	37,5 47,0	-11,2 -11,2	80	1000
7	3725	6050	34	15×15(A5) 5 ×11(A6)	17×17(A7) 5×11(A8)	27,7 34,2	-11,2 -2,5	15	1000



## Продовження таблиці 2.4

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
8	3775	6100	34	15×15(A3) 5×11(A4)	17×17(A7) 17×17(A7)	27,6 34,2	-11,2 -11,2	15	1000
9	3825	6150	34	15×15(A5) 5×11(A6)	17×17(A7) 5×11(A8)	27,7 34,2	-11,2 -2,5	15	1000
10	3875	6200	34	15×15(A3) 5×11(A4)	17×17(A7) 17×17(A7)	27,6 34,2	-11,2 -11,2	15	1000
11	3925	6250	34	15×15(A5) 5×11(A6)	17×17(A7) 5×11(A8)	27,7 34,2	-11,2 -2,5	15	1000
14	3975	6300	34	5×5(A2) 5×11(A4)	5×11(A8) 5×11(A8)	38,6 34,2	-2,5 -2,5	15	1000
15	4025	6350	34	15×15(A5) 5×11(A6)	17×17(A7) 5×11(A8)	27,7 34,2	-11,2 -2,5	15	1000
16	4075	6400	34	5×5(A2) 5×11(A4)	5×11(A8) 5×11(A8)	38,6 34,2	-2,5 -2,5	15	1000
17	4125	6450	34	15×15(A5) 5×11(A6)	17×17(A7) 5×11(A8)	27,7 34,2	-11,2 -2,5	15	1000

На рисунках 2.5 і 2.6 наведено як приклад контури рівного посилення на передачу і на приймання, що визначають зону обслуговування, для БР КАЗ "Експрес" з орбітальною позицією 80°сд.

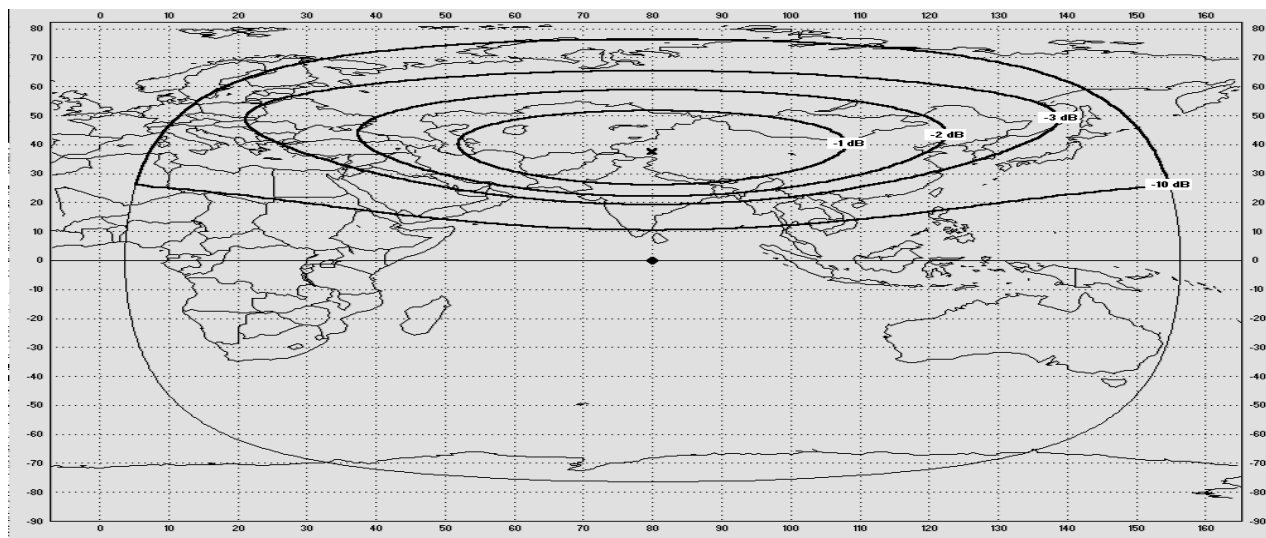


Рисунок 2.5 – Контури рівного посилення на передачу транспондерів № 7, 9, 11, 15, 17 (антена А6 (5°x11°)) і транспондерів № 8, 10, 14, 16 (антена А4 (5°x11°)) для КАЗ з орбітальною позицією 80° сд

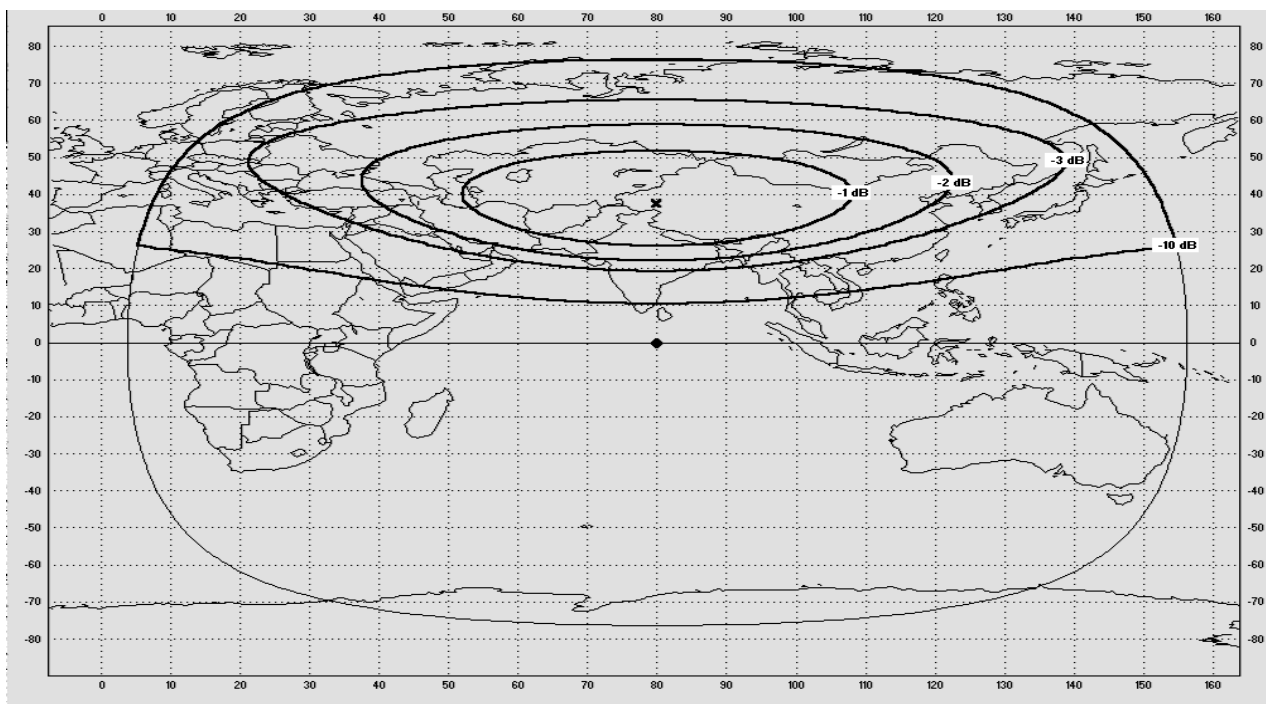


Рисунок 2.6 – Контури рівного посилення на прийом транспондерів № 7, 9, 11, 14, 15, 16, 17 (антена А8 (5°x11°)) для КАЗ з орбітальною позицією 80° сд

### 2.1.3 Основні характеристики БР КАЗ "Експрес-А"

Супутники "Експрес-А" обладнані антенами, що забезпечують приймання і передачу сигналів у діапазонах С і Ku. Передавальні і приймальні антени транспондерів позначаються за величиною розкриття діаграми спрямованості антени в градусах.

У межах зони обслуговування транспондери супутників забезпечують приймання і передачу будь-якого виду інформації (телебачення, радіомовлення, передача газетних смуг, відеоконференцзв'язок, телефонні, телеграфні і факс повідомлення, дані, цифрові потоки, у тому числі в режимі TDMA з тривалістю кадру, що не перевищує 40 мс, та ін.) при використуванні різних типів земних станцій.

Типи й основні характеристики антен, що використовуються на супутнику "Експрес-А", подані в таблиці 2.5.

Таблиця 2.5 – Типи антен, що використовуються на супутнику «Експрес-А»

Тип	ДС ( $\alpha^\circ \times \beta^\circ$ )	Характеристики й особливості антен
A1	17×17	Глобальна антена, орієнтована в підсупутникову точку
A2	5×5 передавальна	Зонова антена, яка має можливість перенацілювання в процесі експлуатації осі головної пелюстки ДС антени в межах 8° у напрямі Північ, у межах 4° у напрямі Південь і +/-7° у напрямі Захід-Схід відносно точки прицілювання
A3	15×15 передавальна	Квазіглобальна антена, орієнтована в підсупутникову точку
A4	5×11 передавальна	Зонова антена, яка має можливість перенацілювання в процесі експлуатації осі головної пелюстки ДС антени в межах +/-8° у напрямі Північ-Південь і +/-8° у напрямі Захід-Схід відносно точки прицілювання
A6	5×11 передавальна	Зонова антена, яка націлюється в заводських умовах в задану точку
A7	17×17 приймальна	Глобальна антена, орієнтована в підсупутникову точку
A8	5×11 приймальна	Зонова антена, яка націлюється в заводських умовах в задану точку
A9	3.5×7 приймально- передавальна	Зонова антена, яка має можливість перенацілювання в процесі експлуатації осі головної пелюстки ДН антени в межах 7° на Північ, 0° на Південь і +/-4° у напрямі Захід-Схід відносно точки прицілювання

Супутник "Експрес" має декілька варіантів конфігурації підключення транспондерів до антен на супутнику відповідно до схеми, наведеної на рисунку 2.7. Точки прицілювання бортових антен задаються для кожного БР КАЗ індивідуально і можуть змінюватися в міру необхідності у вказаних у таблиці 2.5 межах.

На рисунку 2.7 зображено структурну схему організації підключення транспондерів до антен на супутнику "Експрес-А".

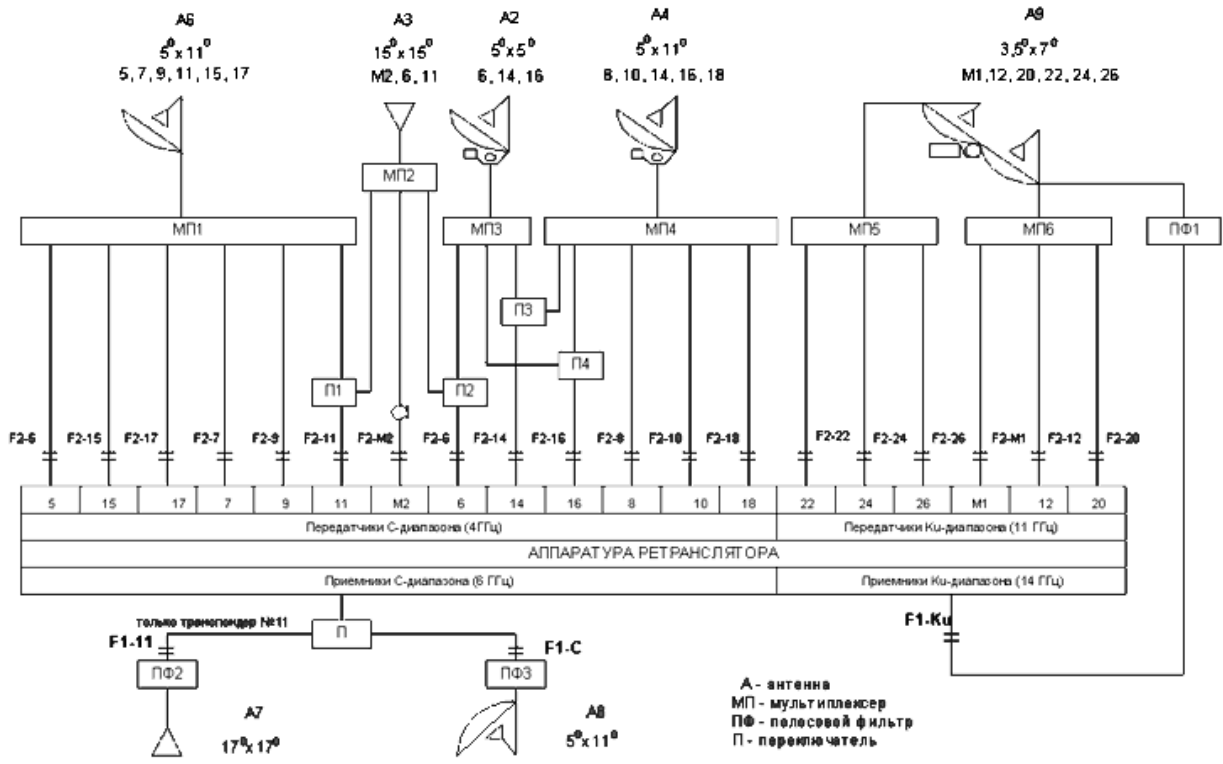


Рисунок 2.7 – Конфігурації підключення транспондерів до антен на супутнику "Експрес-А"

Основні параметри стволів БР КАЗ "Експрес-А", необхідні для виконання енергетичних розрахунків супутникових радіоліній і мереж при використуванні різних конфігурацій транспондерів і бортових антен, подані в таблиці 2.6.

Таблиця 2.6 – Основні характеристики стволів БР КАЗ "Експрес-А" з точками стояння 14°зд, 11°зд, 40°сд, 53°сд, 80°сд, 90°сд, 96,5°сд, 103°сд, 140°сд, 145°сд

Ствол	Сер. частота, МГц		Δf, МГц	ДС, град α°×β°		ЕІВП	G/T, дБ/К	Рпдб, Вт	Тшб, К°
	ПРД	ПРМ		ПРД	ПРМ				
				в центрі зони обслуговування, дБ					
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
5	3625	5950	36	5×5(A2)	5×11(A8)	36,5	0,2	15	500
6	3675	6000	40	5×5(A2)	5×11(A8)	48,0	0,2	80	500
				15×15(A3)	5×11(A8)	37,0	0,2		
7	3725	6050	36	5×5(A2)	5×11(A8)	36,5	0,2	15	500
8	3775	6100	36	5×11(A4)	5×11(A8)	40,0	0,2	15	500

Ствол	Сер. частота, МГц		$\Delta f$ , МГц	ДС, град $\alpha^\circ \times \beta^\circ$		ЕІВП	G/T, дБ/К	Рпдб, Вт	Тшб, К°
9	3825	6150	36	5 × 5(A2)	5 × 11(A8)	36,5	0,2	15	500

Продовження таблиці 2.6

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
10	3875	6200	36	5 × 11(A4)	5 × 11(A8)	40,0	0,2	15	500
11	3925	6250	36	15 × 15(A3)	5 × 11(A8)	29,9	0,2	15	500
				5 × 11(A6)	17 × 17(A7)	36,5	-8,5		
14	3975	6300	36	5 × 5(A2)	5 × 11(A8)	40,5	0,2	15	500
				5 × 11(A4)	5 × 11(A8)	36,4	0,2		
15	4025	6350	36	5 × 5(A2)	5 × 11(A8)	36,5	0,2	15	500
16	4075	6400	36	5 × 5(A2)	5 × 11(A8)	40,5	0,2	15	500
				5 × 11(A4)	5 × 11(A8)	36,4	0,2		
17	4125	6450	36	5 × 5(A2)	5 × 11(A8)	36,5	0,2	15	500
18	4175	6500	36	5 × 11(A4)	5 × 11(A8)	40,0	0,2	15	500
Маяк М2	3800			15 × 15(A3)		12,9			
12	11525	14325	36	3.5 × 7(A9)	3.5 × 7(A9)	43,5	5,3	15	500
20	11625	14425	36	3.5 × 7(A9)	3.5 × 7(A9)	43,5	5,3	15	500
22	11475	14275	36	3.5 × 7(A9)	3.5 × 7(A9)	43,5	5,3	15	500
24	11575	14375	36	3.5 × 7(A9)	3.5 × 7(A9)	43,5	5,3	15	500
26	11675	14475	36	3.5 × 7(A9)	3.5 × 7(A9)	43,5	5,3	15	500
Маяк М1	11400	-		3.5 × 7(A9)		19,8			

Діапазон зміни коефіцієнтів посилення транспондерів подано в таблиці 2.7. Він залежить від номера ствола і типу антени, що використовується. Контури рівного посилення на передачу і на приймання транспондерів КАЗ «Експрес-А» відповідно наведено на рисунку 2.8 та 2.9.

Таблиця 2.7 – Діапазон зміни коефіцієнтів посилення транспондерів БР КАЗ "Експрес-А"

Номер ствола (тип антени)	Діапазон зміни $K_{УС}$ , дБ
5, 7, 9, 11, 14-18 (від А8)	102-114
6 (від А8)	106-122

8, 10 (від А8)	102-116
11 (від А7)	109-121
12, 20, 22, 24, 26 (від А9)	110-125

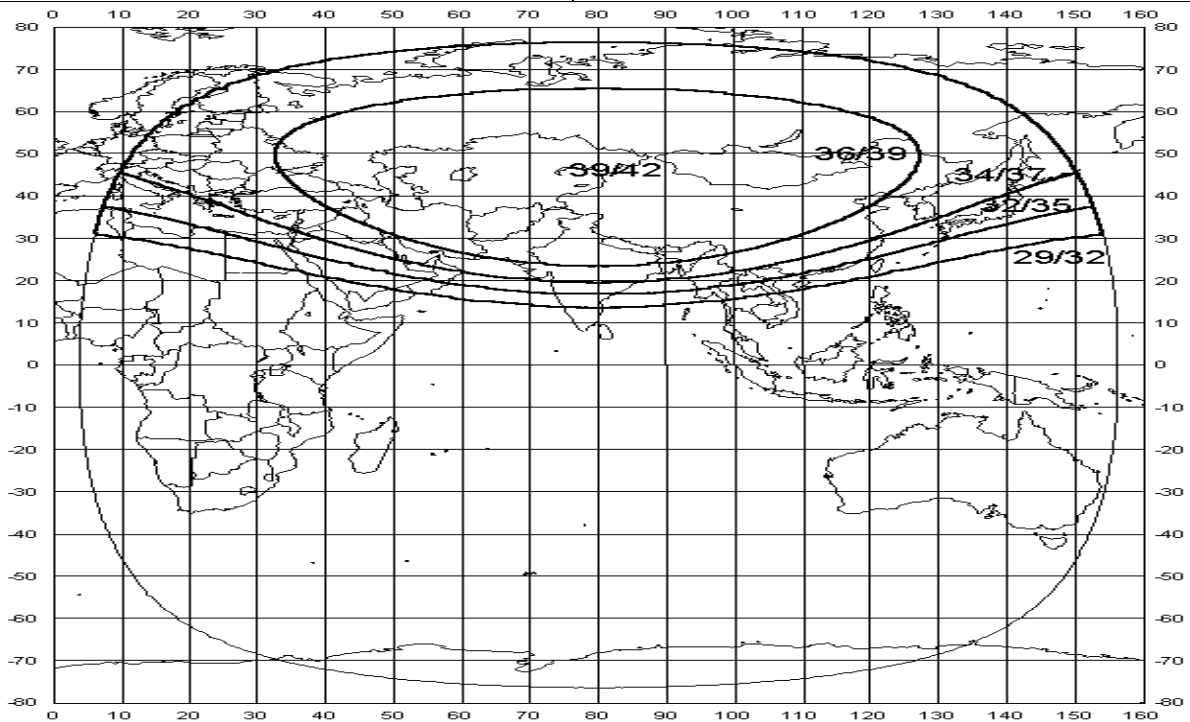


Рисунок 2.8 – Контури рівного посилення на передачу транспондерів № 5, 7, 9, 11, 15, 17 (антена А6 (5°x11°)) і транспондерів № 8, 10, 14, 16, 18 (антена А4 (5°x11°)) для КАЗ "Експрес-А" з орбітальною позицією 80°сд

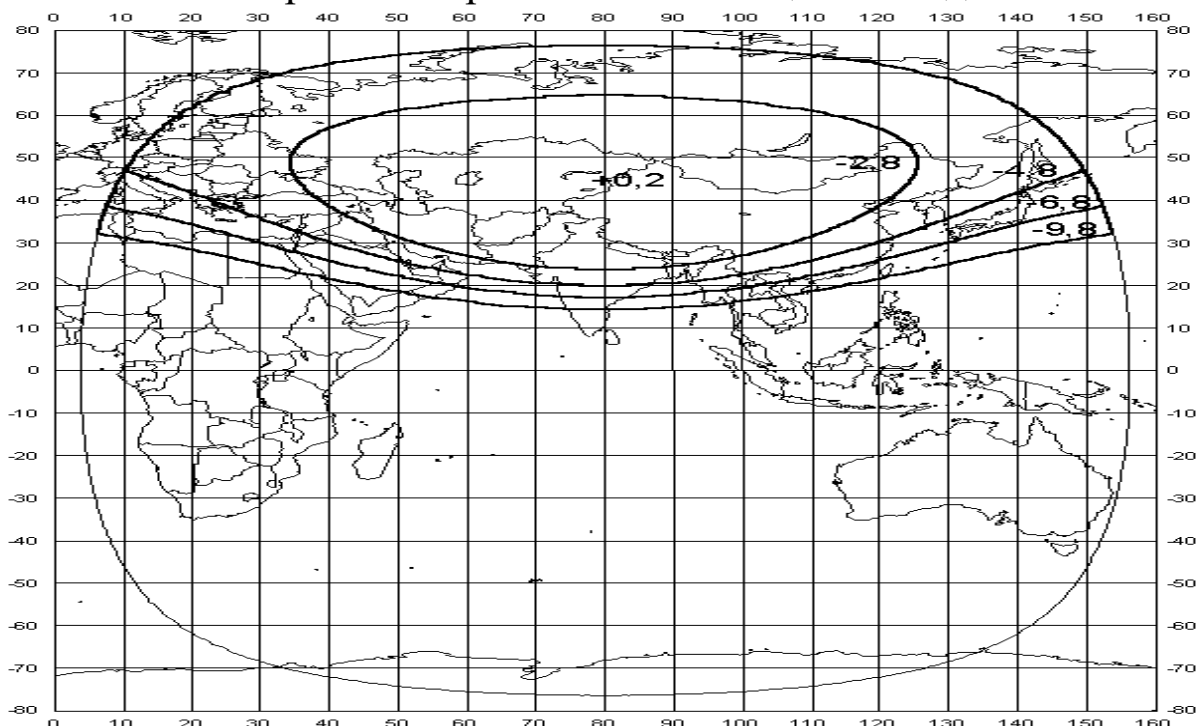


Рисунок 2.9 – Контури рівного посилення на приймання транспондерів № 5 - 11 і 14 - 18 (антена А8 (5°x11°)) для КАЗ "Експрес-А" з орбітальною позицією 80° сд

### 2.1.4 Основні характеристики БР КАЗ системи "Intelsat"

Характеристики, аналогічні російським БР КАЗ "Горизонт", "Експрес" і "Експрес-А", мають супутники Intelsat V, Intelsat F5-F9, Intelsat VA і Intelsat VI. Узагальнені енергетичні характеристики деяких типів БР КАС Intelsat для С – діапазону (4...6 ГГц) наведено в таблиці 2.8. Більш повні відомості, достатні для проведення енергетичних розрахунків супутникових радіоліній і мереж в Ku-діапазоні, наведено в таблиці 2.9.

Таблиця 2.8 – Енергетичні характеристики супутників "Intelsat"

Тип бортової антени (променя)	Intelsat V		Intelsat VA(F5-F9)		Intelsat VI	
	ЕІВПmin, дБВт	G/T, дБ/ °К	ЕІВПmin, дБВт	G/T, дБ/ °К	ЕІВПmin, дБВт	G/T, дБ/ °К
Півсфера східної Півкулі	29,0	-11,6	29,0	-9,0	31,0	-9,2
Півсфера західної Півкулі	29,0	-11,6	29,0	-9,0	31,0	-9,2
Глобальна зона А	23,5	-18,5	23,5	-16,0	23,5	-14,0

Таблиця 2.9 – Характеристики стволів Ku-діапазону, що належать INTELSAT 604 і INTELSAT 9

Параметр бортового ретранслятора	INT.-604		INT.-9
	1	2	3
Орбітальна позиція (довгота)	60° сд		60°сд
Діапазон частот: на приймання, ГГц на передачу, ГГц	14,00..14,50		14,0..14,500
	10,95..11,20		10,95..11,20
	11,45..11,70		11,45..11,70
Ширина смуги пропускання ствола бортового ретранслятора $\Delta F_{СТВ}$ , МГц	72		36
	150		72
Тип променя Ku-діапазону	West	East	Spot-1,2

Точка прицілювання бортової антени (приблизне):	-широта -довгота	приблизно 40° пш 36° сд	50,05°пш 45,52° сд	приблизно 40(50)° пш 35(22)° сд
---	---------------------	-------------------------------	-----------------------	---------------------------------------

### Продовження таблиці 2.9

1	2	3	4
Перетин діаграми спрямованості антени $\alpha^\circ \times \beta^\circ$ на рівні -3 дБ	1,8° × 3,2°	2,8° × 1,4°	3,25°×3,25°*
Максимальна (у режимі насичення) потужність передавача бортового ретранслятора $P_{ПДБ\ MAX}, Вт (дБВт)$	40 (16.0)	40 (16.0)	102 (20.09)
Втрати в АВТ на передачу, дБ	3,3**	0,5**	2,3*
ЕІВП у напрямі максимуму випромінювання, дБВт	49,2	48.7	52,0
Добротність приймальної системи в напрямі максимуму ДС бортової антени, $\left(\frac{G_{ПР.Б}(0)}{T_{ШБ}}\right)_{дБ}, дБ/ К$	+7,9	+8,53	+5,0
Шумова температура, приведена до входу бортового ретранслятора $T_{ШБ}$ (приблизна оцінка), К	697,6*	886,6*	832,2*
Втрати в АХТ на прийом, дБ	0,5**	0,5**	0,5**
Примітки: * - розраховане значення; **- приблизне значення.			

## 2.2 Вибір типу і характеристик ЗС для побудови мереж супутникового зв'язку

При виборі типу і характеристик ЗС необхідно враховувати такі чинники:

- 1 Можливість роботи через БР КАЗ обраного типу.
- 2 Можливість забезпечення достатньо високих швидкостей передачі інформації (не менше 64 кбіт/с).
- 3 Можливість забезпечення заводо захищеного режиму передачі.



4 Можливість оперативного перенацілювання антени ЗС на будь-якій БР КАЗ, що знаходиться в зоні радіовидимості.

5 Можливість використання ЗС як у прикінцевому, так і в мікровузловому режимах.

6 Можливість створення центральної станції (HUB) для побудови мереж супутникового зв'язку з топологією типу "зірка".

7 ЗС повинна відповідати всім вимогам і рекомендаціям МККР по ЕМС, а в разі оренди ресурсу космічного сегмента в іноземних і міжнародних організацій – стандартам даних організацій.

8 ЗС повинні виготовлятися як у стаціонарному, так і в рухомому варіантах.

### 2.3 Визначення допустимої потужності передавача ЗС

Очевидно, з одного боку, що при збільшенні потужності передавача ЗС підвищується завадостійкість і пропускна спроможність супутникового радіоканалу. А з іншого боку, при оренді частотно-енергетичного ресурсу БР КАЗ в іноземних і міжнародних організацій необхідно, щоб ЗС відповідала всім вимогам і рекомендаціям МККР з ЕМС і стандартам даних організацій. Відповідно до рекомендацій 455-2 і 580-1 МККР за відсутності експериментально знятої діаграми спрямованості (ДС) антени земної станції супутникового зв'язку для антени з  $D/\lambda \leq 100$  пропонується використовувати таку еталонну ДС:

$$\begin{aligned} G_A &= 52 - 10(D/\lambda) - 25 \lg \varphi \quad \text{при } 100 \lambda/D \leq \varphi < 48^\circ, \\ G_A &= 10 - 10 \lg(D/\lambda) \quad \text{при } 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ. \end{aligned} \quad (2.1)$$

Але з іншого боку, відповідно до Рекомендацій 524-2 МККР максимально допустимі рівні густини позавісної ЕІВП земних станцій, що працюють на передачу в С-діапазоні, не повинні перевищувати величину

$$\text{ЕІВП}_{\Delta F=4\text{дБ}} = \begin{cases} 35 - 25 \lg \varphi \quad (\text{Вт}/4\text{кГц}) & 2,5^\circ \leq \varphi < 48^\circ, \\ -7 \text{ дБ} \quad (\text{Вт}/4\text{кГц}) & 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ. \end{cases} \quad (2.2)$$

Оскільки  $E_{\text{ВП}} (\text{дБ}) = P_{\text{дБ}} + G_{\text{дБ}}$ , для заданих класу випромінювань і швидкості передачі можна обчислити відповідну допустиму потужність передавача ЗС.

Враховуючи, що ефективна ширина спектра сигналу при фазовій модуляції

$$\Delta F_{\text{эфф}} \approx 1,4 * \beta * V_u, \quad (2.3)$$

де  $V_u$  – швидкість передачі (біт/с);

$\beta = 1$  для ФМ-2 і  $\beta = 0,5$  для ФМ-4,

на підставі співвідношень (2.2) і (2.3) допустимі значення  $E_{\text{ВП}}$  ЗС дорівнюватимуть

$$\begin{cases} 35 - 25 \lg \varphi + 10 \lg(1,4 * \beta * V_u) - 10 \lg 4000 & 2,5^\circ \leq \varphi < 48^\circ, \\ -7 + 10 \lg(1,5 * \beta * V_u) - 10 \lg 4000 & 48^\circ \leq \varphi \leq 180, \end{cases} \quad (2.4)$$

або

$$E_{\text{ВП}}_{\text{дБ}} = \begin{cases} -1,02 - 25 \lg \varphi - 10 \lg(1,4 * \beta * V_u) & 2,5^\circ \leq \varphi < 48^\circ, \\ -43,02 + 10 \lg(1,4 * \beta * V_u) & 48^\circ \leq \varphi \leq 180^\circ. \end{cases} \quad (2.5)$$

На підставі виразів (2.1) і (2.4) отримаємо розрахункове співвідношення для допустимої потужності передавача ЗС

$$m_{\text{дБ}} = E_{\text{ВП}}_{\text{дБ}} - G_A = -53,02 + 10 \lg(1,4 * \beta * V_u) + 10 \lg\left(\frac{D}{\lambda}\right). \quad (2.6)$$

Для антени з  $D = 2,5 \text{ м}$  і  $\lambda = 0,05 \text{ м}$  ( $f_{\text{пд}} = 6 \text{ ГГц}$ ) вираз (2.6) перетворюється до вигляду

$$P_{\text{ПД доп}} = -36,03 + 10 \lg(1,4 * \beta * V_u). \quad (2.7)$$

Результати, обчислені за формулою (2.7), зведено в таблицю 2.10.

Таблиця 2.10 Допустима потужність передавача ЗС

$V_u$	$\beta$	$P_{\text{ПД доп}}$	
кбіт/с		дБВт	Вт
4,8	1	2,24	1,7

64	0,5	10,49	11,2
48	1	12,24	16,7
64	1	13,49	22,4

Слід зазначити, що результати розрахунку  $P_{\text{ПД доп}}$ , наведені в таблиці 2.10, гарантують виконання рекомендацій МККР, проте є дещо заниженими.

Вихідна потужність підсилювача також повинна бути дещо вище, щоб компенсувати втрати в атмосфері й антенно-хвилевідному тракті. Таким чином, достатньо достовірною оцінкою необхідної потужності підсилювача, що дозволяє виконати рекомендації МККР, є табличні значення, збільшені в 1,2...1,5 разу.

## 2.4 Розрахунок пропускної спроможності мережі супутникового зв'язку

Припустимо, що необхідно оцінити пропускну спроможність повнодоступної мережі супутникового зв'язку, що працює в режимі частотного розділення каналів, якщо задано характеристики ЗС, тип і орбітальну позицію БР КАЗ, відомо кількість станцій у мережі і задано необхідну імовірність помилки при прийманні одного біта інформації. Розв'язання даної задачі зводиться до знаходження швидкості передачі і надмірності завадостійкого кодування, при якій відношення енергії сигналу до спектральної густини потужності сумарних шумів забезпечує необхідну імовірність помилки на біт.

Для повної оцінки енергетичного потенціалу супутникової радіолінії за методикою, викладеною в п. 1, необхідними є:

1 Початкові дані, що належать до характеристик бортового ретранслятора, що використовується:

- координати підсупутникової точки (орбітальна позиція)  $\varphi_n$  і  $\psi_n$  ;
- координати точки прицілювання бортової антени супутника-ретранслятора  $\varphi_u$  і  $\psi_u$  ;
- максимальна (у режимі насичення) потужність передавача бортового ретранслятора  $P_{\text{ПД.Б МАХ}}$  і втрати в АВТ на

передачу або ЕІВП у напрямі максимуму випромінювання  $EIVP_{MAX}$ ;

- величини осей еліпса перетину  $\alpha^\circ \times \beta^\circ$  діаграми спрямованості бортової антени на рівні -3 дБ;

- добротність приймальної системи ретранслятора в напрямі максимуму ДС бортової антени  $\left( \frac{G_{ПР.Б}(0)}{T_{ШБ}} \right)_{дБ}$  або шумова

температура, приведена до входу бортового ретранслятора  $T_{ШБ}$  і втрати в приймальному АХТ, пов'язані співвідношенням (1.44);

- ширина смуги пропускання ствола бортового ретранслятора  $\Delta F_{СТВ}$ .

2 Початкові дані, що належать до характеристик передавальних ЗС:

- потужність передавача ЗС;
- діаметр передавальної антени ЗС;
- точність наведення передавальної антени ЗС на супутник;
- точність виготовлення передавальної антени ЗС;
- коефіцієнт використання площі передавальної антени ЗС;
- втрати у фідері на передачу;
- частота передачі;
- географічні координати передавальної ЗС та її висота над рівнем моря;

- кліматичні умови (кліматичний район), у якому знаходиться передавальна ЗС (погонне ослаблення в кисні і для заданої частоти передачі, погонне ослаблення в дощі, перевищуване в Т% часі для заданої частоти передачі).

3 Початкові дані, що належать до характеристик приймальних ЗС:

- діаметр приймальної антени ЗС;
- точність наведення приймальної антени ЗС на супутник;
- точність виготовлення приймальної антени ЗС;
- коефіцієнт використання площі приймальної антени ЗС;
- втрати у фідері на приймання;
- частота приймання;
- географічні координати приймальної ЗС та її висота над рівнем моря;

- кліматичні умови (кліматичний район), у якому знаходиться приймальна ЗС (погонне ослаблення в кисні і для

заданої частоти приймання, погонне ослаблення в дощі, перевищуване в Т % часі для заданої частоти приймання);

- шумові характеристики приймального тракту (ефективна температура ґрунту навколо станції; температура фонового випромінювання неба; ефективна температура середовища загасання (гази, хмари, дощ); температура хвилеводу, що з'єднує вихід антени з приймачем; коефіцієнт посилення антени відносно ЕІВП, інтегрований по всіх компонентах спрямованості, що протистоять навколишній поверхні землі ("коефіцієнт наземного перехоплення"); ефективна шумова температура приймача (МШУ зі всіма подальшими каскадами), віднесена до входу приймача).

Через велику кількість чинників, що вимагають обліку, громіздкість розрахункових співвідношень і методики розрахунку в цілому для виконання розрахунків потрібно використовувати спеціальне програмне забезпечення. Таке програмно-математичне забезпечення (ПМЗ), орієнтоване на використання ПЕОМ, було розроблено. Його опис дано в додатку А.

Початкові дані, використані як приклад для розрахунку пропускної спроможності мережі супутникового зв'язку, подані в таблиці 2.11.

Таблиця 2.11 – Початкові дані для розрахунку пропускної спроможності мережі супутникового зв'язку

Передавальна станція		
Потужність передавача		10 дБВт
Антенa	Діаметр	2,5 м
	Точність наведення на супутник	0,05°
	Точність виготовлення	5*10 <sup>-4</sup>
	коефіцієнт використання площі антени	0,6
Втрати у фідері		0,4 дБ
Частота		6250 МГц
Географічні координати ЗС	Широта	50,45° пш
	Довгота	30,60 сд
	висота над рівнем моря	0,2 км

Кліматичні умови	погонне ослаблення сигналу в кисні	0,007дБ/км
	погонне ослаблення сигналу в дощі, перевищуване протягом 0,01% часу	0,14 дБ/км

### Продовження таблиці 2.11

Супутник – ретранслятор ("Горизонт" 11 стволів)		
Потужність передавача (з урахуванням зниження потужності на 6 дБ)		5,76 дБВт
Температура шумів, що приведена до входу бортового приймача		2500° К
Ширина ДС приймальної БА	$\alpha$	6°
	$\beta$	12°
Ширина ДС передавальної БА	$\alpha$	6°
	$\beta$	12°
Географічні координати точки прицілювання бортової антени	широта	40° пш
	довгота	53о сд
Довгота підсупутникової точки		53° сд
Приймальна станція		
Антенa	Діаметр	2,5 м
	Точність наведення на супутник	0,00°
	Точність виготовлення	$5 \cdot 10^{-4}$
	Коефіцієнт використання площі антени	0,6
Втрати у фідері на приймання		0,2 дБ
Частота приймання		3925 МГц
Шумові характеристики приймального тракту	Ефективна температура ґрунту навколо станції	290 °К
	Температура фонового випромінювання неба	3 °К
	Ефективна температура середовища	280 °К
	Температура хвилеводу або лінії передачі	290 °К
	"Коефіцієнт наземного перехоплення"	0,05
	Ефективна шумова температура приймача (МШУ зі всіма подальшими каскадами)	75 °К
Географічні координати ЗС	Широта	49,988° пш
	Довгота	36,234° сд

	Висота над рівнем моря	0,2 км
Кліматичні умови	Погонне ослаблення сигналу в кисні	0,0065 дБ/км
	Погонне ослаблення сигналу в дощі, перевищуване протягом 0,01 % часу	0,04 дБ/км

Сутність розрахунку пропускної спроможності мережі супутникового зв'язку полягає в тому, що вибирається певна швидкість передачі інформації і для вибраних початкових даних (див. таблицю 2.11) відповідно до методики, наведеної в першому пункті методичних вказівок, обчислюється відношення сигнал/шум на трасі "земля-борт-земля". Якщо для вибраного методу модуляції (наприклад ФМ-2) отримано відношення сигнал/шум, необхідно для забезпечення заданої імовірності помилки, то швидкість передачі інформації збільшується і розрахунок відношення сигнал/шум на трасі "земля-борт-земля" повторюється. А інакше швидкість передачі інформації зменшується. Після устанавлення швидкості передачі, при якій відношення сигнал/шум строго відповідає заданій завадостійкості, пропускна спроможність приблизно обчислюється за формулою

$$C = N \cdot V_{MAX}(q_{TP}) \quad (2.8)$$

де  $V_{MAX}(q_{TP})$  – швидкість передачі, при якій відношення сигнал/шум строго відповідає заданій імовірності помилки (дорівнює необхідному значенню).

Результати розрахунку відношення сигнал/шум для повнодоступної мережі зі 100 станцій при швидкості передачі 64 кБіт/с на канал, виконаного з використанням розробленого ПМЗ, подано на рисунках 2.10 і 2.11.

Необхідна якість передачі при використанні фазової модуляції ФМ-2 (PSK) або ФМ-4 (QPSK) за відсутності завадостійкого кодування і при згортковому кодуванні з декодуванням за Вітебі з "м'яким рішенням" забезпечується, якщо відношення енергії сигналу на один біт інформації ( $E_b$ ) до спектральної густини потужності шуму ( $N_0$ ) перевищує значення, наведені в таблиці 2.12 (стандарт EUTELSAT EESS 501).

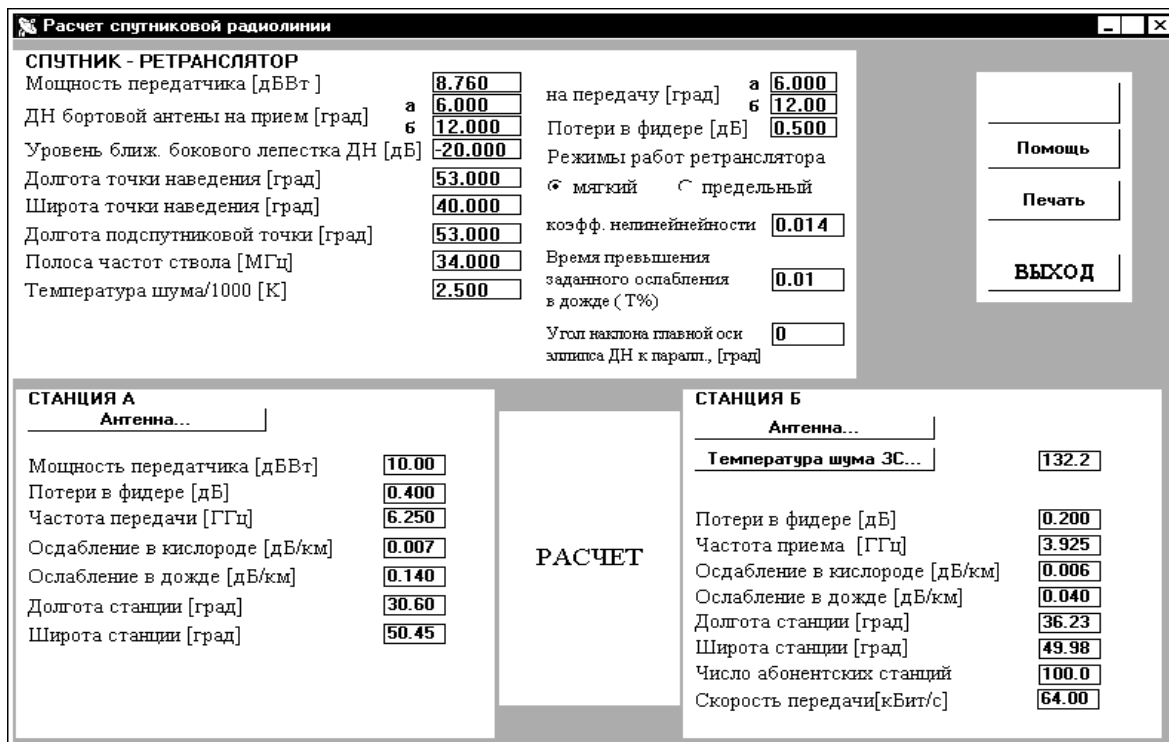


Рисунок 2.10. – Вікно робочої програми з введеними початковими даними

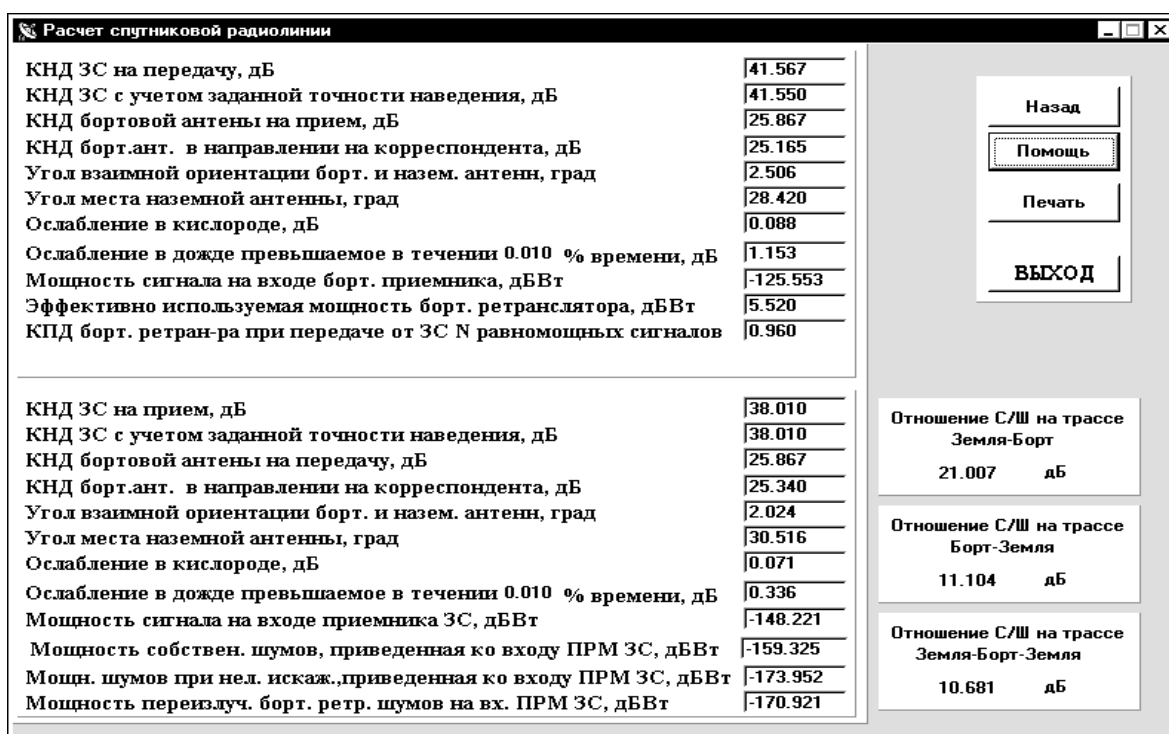


Рисунок 2.11. – Вікно робочої програми з результатами розрахунку



Таблиця 2.12 – Залежність завадостійкості приймання від швидкості кодування і відношення енергії сигналу до спектральної густини потужності шуму

R <sub>ош.</sub>	ШВИДКІСТЬ КОДУВАННЯ		
	1 (без кодування)	3/4	1/2
10-3	6,8	5,3	4,2
10-4	8,4	6,2	4,7
10-5	9,6	7,0	5,4
10-6	10,5	7,6	6,1
10-7	11,3	8,3	6,7

Отримане в результаті розрахунку відношення сигнал/шум на трасі "земля-борт-земля", дорівнює  $E_b/N_0=10,681$  дБ, показує, що забезпечується імовірність помилки на біт не гірше  $10^{-6}$ . При цьому реальна пропускна спроможність мережі, обчислена за формулою (2.8), буде дорівнювати, кБіт/с,

$$C = 100 \cdot 64 = 6400. \quad (2.9)$$

При використанні завадостійкого кодування зі швидкістю  $R=1/2$  для забезпечення імовірності помилки на Біт не гірше  $10^{-6}$  необхідним є відношення  $E_b/N_0=6,1$  дБ (див. таблицю 2.12). Виконуючи послідовну зміну швидкості передачі і проводячи обчислення, аналогічні викладеним вище, нескладно показати (див. додаток А, рисунок А.1 і А.2), що необхідне значення  $E_b/N_0$  забезпечується при технічній швидкості передачі  $V = 183,7$  кБіт/с. Інформаційна швидкість залежить від швидкості кодування і дорівнює  $V_{и} = V \cdot R$ , а реальна пропускна спроможність мережі може бути обчислена за формулою

$$C = N \cdot V \cdot R. \quad (2.10)$$

Таким чином, обчислена реальна пропускна спроможність мережі при використанні завадостійкого кодування з  $R = 1/2$  дорівнює, кБіт/с,

$$C = 100 \cdot 183,7 \cdot 0,5 = 9185. \quad (2.11)$$

Зіставляючи результати виразів (2.9) і (2.11), можна зробити висновок, що використання завадостійкого кодування є доцільним.

## 2.5 Телевізійні стандарти зображення

При розрахунку супутникових радіоліній необхідно задати стандарт телевізійного мовлення, для якого будується система. Найбільш широко використовуються сумісні стандарти кольорового телебачення: PAL, NTSC і SECAM, які мають ряд різновидів. Сучасні побутові телевізійні приймачі забезпечують можливість автоматичного (або ручного) перемикання на необхідний стандарт.

У США з 1997 р. упроваджується новий цифровий стандарт, який після 2000 р. повністю замінив існуючий стандарт (аналоговий) NTSC.

Для супутникового телебачення розроблено спеціальні стандарти (аналого-цифрові) MAC і MUSE.

Останнім часом активно упроваджуються стандарти з цифровим ущільненням MPEG.

### 2.5.1 Стандарти PAL, SECAM, NTSC

Система PAL поширена в більшості країн: Австрія, Бельгія, Велика Британія, Німеччина, Данія, Італія, Іспанія, Нідерланди, Норвегія, Португалія, Туреччина, Швейцарія, Австралія, Аргентина, Бразилія, Індія, Китай, Сирія та ін. – всього 50 країн. Система NTSC поширена в США, Канаді, Японії, Болівії, Гватемалі, Гондурасі, Домініканській Республіці, Колумбії, на Кубі, у Мексиці, Нікарагуа, Перу, на Філіпінах, у Сальвадорі, Південній Кореї тощо – всього 30 країн. Система SECAM використовується в таких країнах: СНГ, Болгарія, Угорщина, Чехія, Словаччина, Польща, Румунія, Франція, Німеччина (колишня НДР), Греція тощо – всього 26 країн.

Між системами PAL, NTSC, SECAM відмінності полягають у методах отримання повного відеосигналу з сигналів трьох основних кольорів, у способах модуляції колірної піднесучої і заходах, що вживаються для зменшення взаємних завад між колірною піднесучою і сигналом яскравості, у рознесенні несучих частот зображення і звукового супроводу. Кожний з

зазначених телевізійних стандартів має свої переваги і недоліки, які для споживача практично не відчутні.

Загальним для систем PAL, NTSC, SECAM є те, що можливості підвищення якості зображення обмежені. Це обумовлено такими чинниками: перехресними спотвореннями між сигналами кольоровості і яскравості, шумами кольоровості, пороговими властивостями частотної модуляції, інтермодуляцією колірної піднесучої і звукового сигналу, зернистістю структури зображення.

### **2.5.2 Стандарти MAC і MUSE**

Для усунення більшості недоліків, властивих системам телебачення (ТБ) з частотним ущільненням, був розроблений стандарт для систем з ущільненням за часом сигналів яскравості і кольоровості, який отримав назву MAC (Multiplexed Analogue Components – ущільнені аналогові компоненти).

Варіанти MAC (A, B, C, D, D-2) відрізняються способами ущільнення цифрових сигналів звуку і додаткової сервісної інформації у відеосигналі. Система C-MAC прийнята у Великій Британії, Фінляндії, Данії, Ісландії, Норвегії, Швеції; система B-MAC – в Австрії (стандарт розкладання 625 рядків), США і Канаді (стандарт розкладання 525 рядків).

Сучасні абонентні приймачі супутникового телемовлення, як правило, мають вихід до декодера MAC або вбудованого декодера.

В Японії корпорацією NHK розроблено стандарт MUSE (Multiple Sub Sampling Encoding) спеціально для телебачення високої чіткості в стандартній смузі частот 27 МГц.

Вказані стандарти було закладено в основу індустрії супутникового телемовлення високої чіткості (ТБВЧ). Проте широке розповсюдження систем ТБВЧ стримується необхідністю заміни парку звичайних споживацьких телевізійних приймачів на приймачі ТБВЧ і їх відносно високою вартістю (телевізійний приймач у стандарті MUSE коштував приблизно 4000 дол. в 1996 р.).

### 2.5.3 Стандарт MPEG

Стандарт MPEG передбачає перетворення ТБ-сигналу в цифрову форму і його стиснення за рахунок усунення надмірності. Надмірність пов'язана з рядом особливостей: два послідовні кадри слабо відрізняються один від одного (часова надмірність); основна частина зображення містить слаборозрізнені для ока людини однотонні кольори (просторова надмірність); зображення містить різко відмінні світлі і темні тони (амплітудна надмірність).

У першому і другому випадках надмірність усувається шляхом передачі тільки інформації, що характеризує зміну ТБ-сигналу. В останньому випадку – усувається на етапі кодування.

Існує два основні різновиди стандарту MPEG (MPEG-1 MPEG-2). Найперспективнішим є MPEG-2. Цей стандарт має декілька варіантів залежно від числа елементів розкладання ТБ-сигналу.

Відповідність числа елементів, якості зображення і швидкості передачі наведено в таблиці 2.13.

Таблиця 2.13 – Відповідність якості зображення і швидкості передачі

Кількість елементів розкладання	Якість сигналу	Швидкість передачі, Мбіт/с
352x288	Низька	4
720x576	Студійна	15
1440x1152	ТБВЧ	60
1920x1152	ТБВЧ	100

У стандартному супутниковому каналі є можливість трансляції декількох ТБ-програм у стандарті MPEG-2.

Потенційно досяжна швидкість цифрового потоку (TDM) у стволі з заданою смугою пропускання наведено в таблиці 2.14.

Таблиця 2.14 – Потенційно досяжна швидкість цифрового потоку в стволі із заданою смугою пропускання

Задана смуга пропускання ствола, МГц	Потенційно досяжна швидкість цифрового потоку, Мбіт /с
36	46.6
27	35.0
24	31.0

Необхідні швидкості передачі потоку (Мбіт/с) залежно від характеру зміни сюжету і необхідної якості наведено в таблиці 2.15.

Таблиця 2.15 – Необхідні швидкості передачі залежно від необхідної якості

Вид передачі зображення (звуку)	Швидкість передачі потоку, Мбіт/с
Телеконференція	1,152
Відеофільм	3,456
Спорт	4,608
Широкоформатне телебачення (16:9)	5,706
Студійне телебачення (CCIR-601)	8,064
Телебачення високої чіткості	>14
Звуковий супровід:	
моно.....	0,192
стерео.....	0,256

Наведені в п. 2.5 дані дозволяють визначити необхідні швидкості групових потоків і відповідні їм необхідні смуги пропускання стволів бортових ретрансляторів.

## **2.6 Енергетичний розрахунок мережі телевізійного мовлення**

Проведемо розрахунок основних параметрів мережі телевізійного супутникового мовлення, що забезпечує студійну якість приймання в 99,99 % часу при передачі телевізійних сигналів у форматі MPEG-2:

- а) потужність передавача;
- б) діаметр передавальної антени;

в) діаметр приймальної антени при заданих географічних координатах пункту приймання.

Вважатимемо, що мовлення ведеться через 11-й ствол супутника-ретранслятора "Горизонт", що знаходиться на орбітальній позиції 53 сд, характеристики якого наведено в таблицях 2.1 і 2.2. З урахуванням завадостійкого кодування, яке використовується в стандарті MPEG-2, що вимагається для забезпечення необхідної якості, відношення сигнал/шум дорівнює 6,5 дБ (визначається стандартом), а швидкість цифрового потоку дорівнює 15 Мбіт/с (див. таблицю 2.13).

Для забезпечення енергетично рівноважного стану БР КАЗ "Горизонт" необхідно, щоб відношення сигнал/шум на вході бортового приймача було дорівнювало (21 – 22) дБ, що визначає ЕІВП передавальної станції супутникового зв'язку. Решта параметрів ЗС і БР, узятих як початкові, наведено в таблиці 2.16. Враховано, що для передачі одного телевізійного каналу використовується не більше половини частотних, а отже, і енергетичних ресурсів ствола (тобто при виконанні розрахунків потужність насичення передавача БР КАЗ знижена на 3 дБ).

Таблиця 2.16 – Початкові дані для розрахунку мережі супутникового телевізійного мовлення

Передавальна станція		
Потужність передавача		*** дБВт
Антенa	Діаметр	*** м
	Точність наведення на супутник	0,05°
	Точність виготовлення	5*10-4
	Коефіцієнт використання площі антени	0,6
Втрати у фідері		0,4 дБ
Частота		6250 МГц
Географічні координати ЗС	Широта	50,45° пш
	Довгота	30,6° сд
	Висота над рівнем моря	0,2 км
Кліматичні умови	Погонне ослаблення сигналу в кисні	0,007дБ/км
	Погонне ослаблення сигналу в дощі, перевищуване протягом 0,01% часу	0,14 дБ/км
Супутник – ретранслятор ("Горизонт" 11 стволів)		
Потужність передавача (з урахуванням зниження потужності на 6 дБ)		8,76 дБВт
Температура шумів приведена до входу бортового приймача		2500° К

Продовження таблиці 2.16

Ширина ДС приймальної БА	$\alpha$	6°
	$\beta$	12°
Ширина ДС передавальної БА	$\alpha$	6°
	$\beta$	12°
Географічні координати точки прицілювання бортової антени	широта	40° пш
	довгота	53° сд
Довгота підсупутникової точки		53° сд
Приймальна станція		
Антенa	Діаметр	*** м
	Точність наведення на супутник	0,05°
	Точність виготовлення	5*10 <sup>-4</sup>
	Коефіцієнт використання площі антени	0,6
Втрати у фідері на приймання		0,2 дБ
Частота приймання		3925 МГц
Шумові характеристики приймального тракту	Ефективна температура ґрунту навколо станції	290 К
	Температура фонового випромінювання неба	3 К
	Ефективна температура середовища загасання	280 К
	Температура хвилеводу або лінії передачі	290 К
	"Коефіцієнт наземного перехоплення"	0,05
	Ефективна шумова температура приймача (МШУ зі всіма подальшими каскадами)	35 К
Географічні координати ЗС1 (м. Харків)	Широта	49,988° пш
	Довгота	36,234° сд
	Висота над рівнем моря	0,2 км
Географічні координати ЗС2 (м. Алупка)	Широта	44.36°
	Довгота	34.2° сд
	Висота над рівнем моря	0,03 км
Географічні координати ЗС3 (м. Ужгород)	Широта	48.643°
	Довгота	22.2° сд
	Висота над рівнем моря	0,2 км
Кліматичні умови	Погонне ослаблення сигналу в кисні	0,0065 дБ/км
	Погонне ослаблення сигналу в дощі, перевищуване протягом 0,01 % часу	0,04 дБ/км

Результати розрахунку діаметра антени і необхідної потужності передавальної антени, а також мінімального необхідного діаметра антени приймальних станцій із заданими географічними координатами їх розташування, виконані за методикою, викладеною в першому пункті методичних вказівок з використанням розробленого програмного забезпечення на ПЕОМ, подано в таблиці 2.17.

Таблиця 2.17 – Результати розрахунку основних характеристик системи СТБ

Станція ТБ мовлення	Географічні Координати		$D_{A\text{ ПРД}}$ , м	$P_{\text{ПРД}}$ , Вт	$D_{A\text{ ПРМ}}$ (мінімум), м
Передавальна м. Київ	Північна широта	50,45°	6,0	1000	
	Східна довгота	30,6°			
	Висота над рівнем моря	0,2 км			
Приймальна м. Харків	Північна широта	49,988°			2,363
	Східна довгота	36,234о			
	Висота над рівнем моря	0,2 км			
Приймальна м. Алушка	Північна широта	44,36°			2,685
	Східна довгота	34,2°			
	Висота над рівнем моря	0,03 км			
Приймальна м. Ужгород	Північна широта	48,643°			2,835
	Східна довгота	22,2°			
	Висота над рівнем моря	0,2 км			

Таким чином, нормальне функціонування мережі супутникового телевізійного мовлення в стандарті MPEG-2 гарантовано забезпечується на всій території України при діаметрі приймальних антен 3 м.



## СПИСОК ЛІТЕРАТУРИ

- 1 Спилкер Дж. Цифровая спутниковая связь: пер. с англ. / Под ред. В.В. Маркова. – М.: Связь, 1979. – 421 с.
- 2 Рекомендации и отчеты МККР. Т. IV. Ч. 1. Фиксированная спутниковая служба. – Дубровник, 1986. – 560 с.
- 3 Бородич С.В. ЭМС наземных и космических радиослужб. Критерии, условия и расчет. – М.: Радио и связь, 1990. – 272 с.
- 4 Энергетические характеристики космических радиолиний / Под ред. О.А. Зенкевича. – М.: Сов. радио, 1972. – 436 с.
- 5 Калинин А.И. Распространение радиоволн на трассах наземных и космических радиолиний. – М.: Связь, 1979. – 296 с.
- 6 Регламент радиосвязи. – М.: Радио и связь, 1985. – Т. 1. – 509 с.
- 7 Спутниковая связь и вещание: Справочник / В.А. Бартенев, Г.В. Болотов, В.Л. Быков и др.; Под ред. Л.Я. Кантора. – 3-е изд., перераб. и доп. – М.: Радио и связь, 1997. – 528 с.
- 8 Виноградов Б.Н. Глобальные спутниковые системы связи и сети ЭВМ // Технологии электронных коммуникаций. – М., 1993. – С. 14.
- 9 Корпоративные системы спутниковой и КВ связи / Под ред. А.А. Смирнова. – М.: Эко-Трендз, 1997. – 132 с.
- 10 Невдяев Л.М., Смирнов А.А. Персональная спутниковая связь. – М.: Эко-Трендз, 1998. – 215 с.
- 11 Ермилов В.Т. Международное регулирование применения земных станций спутниковой связи типа VSAT. – М.: Радио и связь; Горячая линия – Телеком, 1999. – 284 с.
- 12 Спутниковые системы связи и вещание. Ежегодник 1998/1999. – М.: Издательское предприятие редакции журнала "Радиотехника", 1998. – Ч. I, II.
- 13 Машбиц Л.М. Компьютерная картография и зоны спутниковой связи. – М.: Радио и связь, 2000. – 256 с.

## ДОДАТОК А

Опис реалізованої на ПЕОМ методики енергетичного розрахунку супутникової радіолінії

### 1 Структура і зміст програми

Даний програмний продукт знаходиться в таких файлах:

Project.exe. – програма, що забезпечує обчислення за методикою, описаною в першому пункті методичних вказівок;

satelit. cfg – файл, що містить дані про конфігурацію програми;

satelit. hlp – файл довідкової системи Windows про роботу з даним програмним продуктом;

satelit. ico – файл піктограми даного програмного продукту.

Перерахований набір програм забезпечує нормальне функціонування програмного забезпечення.

Даний програмний продукт написаний під операційну систему Windows 98 з використанням способу візуального програмування Delphi 3 фірми Borland.

Програма є сукупністю процедур і функцій, що реалізують всі пункти описаної в п. 1 методичних вказівок.

### 2 Опис роботи з програмою

Програма запускається файлом Project.exe. При запуску програми на екрані з'являється головне вікно, показане на рисунку А.1. Дані, що вводяться, згруповані в три блоки. У блоці під назвою "СТАНЦІЯ А" вводяться дані про передавальну земну станцію, у блоці під назвою «СУПУТНИК-РЕТРАНСЛЯТОР» - дані про супутник-ретранслятор, а в блоці під назвою "СТАНЦІЯ Б" – дані про приймальну станцію. Всередині блоків для переходу між пунктами використовуються клавіші управління курсором або маніпулятор "миша". Для перемикання між блоками використовується клавіша табуляції.

У блоці для введення даних про передавальну ЗС розташовується кнопка "Антенa", що викликає додаткове вікно,

яке дозволяє вводити детальні відомості про антену передаючої ЗС.

У блоці для введення даних про приймальну ЗС розташовується аналогічна кнопка "Антенa", також кнопка "Температура шуму ЗС", при натисненні на яку з'являється вікно для введення даних, необхідних для розрахунку шумової температури ЗС, що підведена до входу приймача, і кнопка "Перерахувати температуру", що ініціалізувала сам розрахунок. Отриманий результат використовується для обчислень в основній програмі.

У правому верхньому кутку головного вікна програми розташована група службових кнопок, що забезпечують перехід до вікна результатів обчислень, виклик допомоги, роздрукування даних, що вводяться, і вихід з програми.

У центрі головного вікна розташована кнопка, що ініціалізувала початок проведення розрахунку за описаною вище методикою, при натисненні на яку головне вікно програми замінюється на вікно результатів обчислень (рис. А.2).

**Расчет спутниковой радиолинии**

**СПУТНИК - РЕТРАНСЛЯТОР**

Мощность передатчика [дБВт]	<b>8.760</b>
ДН бортовой антенны на прием [град]	<b>6.000</b>
Уровень ближ. бокового лепестка ДН [дБ]	<b>-20.000</b>
Долгота точки наведения [град]	<b>53.000</b>
Широта точки наведения [град]	<b>40.000</b>
Долгота подспутниковой точки [град]	<b>53.000</b>
Полоса частот ствола [МГц]	<b>34.000</b>
Температура шума/1000 [К]	<b>2.500</b>

на передачу [град] **а 6.000**  
**б 12.000**

Потери в фидере [дБ] **0.500**

Режимы работ ретранслятора  
 мягкий     предельный

коэф. нелинейности **0.014**

Время превышения заданного ослабления в дожде (Т%) **0.01**

Угол наклона главной оси эллипса ДН к паралл., [град] **0**

Назад  
Помощь  
Печать  
ВЫХОД

---

**СТАНЦИЯ А**

Антенна...

Мощность передатчика [дБВт]	<b>10.00</b>
Потери в фидере [дБ]	<b>0.400</b>
Частота передачи [ГГц]	<b>6.250</b>
Ослабление в кислороде [дБ/км]	<b>0.007</b>
Ослабление в дожде [дБ/км]	<b>0.140</b>
Долгота станции [град]	<b>30.60</b>
Широта станции [град]	<b>50.45</b>

**СТАНЦИЯ Б**

Антенна...

Температура шума ЗС	<b>132.2</b>
Потери в фидере [дБ]	<b>0.200</b>
Частота приема [ГГц]	<b>3.925</b>
Ослабление в кислороде [дБ/км]	<b>0.006</b>
Ослабление в дожде [дБ/км]	<b>0.040</b>
Долгота станции [град]	<b>36.23</b>
Широта станции [град]	<b>49.98</b>
Число абонентских станций	<b>100.0</b>
Скорость передачи [кБит/с]	<b>183.7</b>

**РАСЧЕТ**

**Характеристики антенны**

Диаметр антенны [м]	<b>2.500</b>
Точность наведения [град]	<b>0.050</b>
Козф. использ. площади антен.	<b>0.600</b>
Точность изготовления/10000	<b>5.000</b>
Высота над уровнем моря [км]	<b>0.200</b>

**Шумовая температура ЗС**

Температура почвы вокруг станции	<b>290.0</b>
Температура фонового излучения неба	<b>3.000</b>
Эффект. температура среды затухания	<b>280.0</b>
Температура фидера	<b>290.0</b>
Температура МШУ	<b>75.00</b>
Коэффициент наземного перехвата	<b>0.050</b>

Пересчитать температуру

Рисунок А.1 – Головне вікно програми, що забезпечує введення початкових даних, ініціалізацію проведення розрахунку

Расчет спутниковой радиолинии				
КНД ЗС на передачу, дБ	41.567			
КНД ЗС с учетом заданной точности наведения, дБ	41.550			
КНД бортовой антенны на прием, дБ	25.867			
КНД борт. ант. в направлении на корреспондента, дБ	25.165			
Угол взаимной ориентации борт. и назем. антенн, град	2.506			
Угол места наземной антенны, град	28.420			
Ослабление в кислороде, дБ	0.088			
Ослабление в дожде превышаемое в течении 0.010 % времени, дБ	1.153			
Мощность сигнала на входе борт. приемника, дБВт	-125.553			
Эффективно используемая мощность борт. ретранслятора, дБВт	5.520			
КПД борт. ретран-ра при передаче от ЗС N равномошньх сигналов	0.960			
КНД ЗС на прием, дБ	38.010			
КНД ЗС с учетом заданной точности наведения, дБ	38.010			
КНД бортовой антенны на передачу, дБ	25.867			
КНД борт. ант. в направлении на корреспондента, дБ	25.340			
Угол взаимной ориентации борт. и назем. антенн, град	2.024			
Угол места наземной антенны, град	30.516			
Ослабление в кислороде, дБ	0.071			
Ослабление в дожде превышаемое в течении 0.010 % времени, дБ	0.336			
Мощность сигнала на входе приемника ЗС, дБВт	-148.221			
Мощность собствен. шумов, приведенная ко входу ПРМ ЗС, дБВт	-154.746			
Мошн. шумов при нел. искаж., приведенная ко входу ПРМ ЗС, дБВт	-169.373			
Мощность переизлуч. борт. ретр. шумов на вх. ПРМ ЗС, дБВт	-166.341			
<div style="text-align: right;"> <input type="button" value="Назад"/>  <input type="button" value="Помощь"/>  <input type="button" value="Печать"/>  <input type="button" value="ВЫХОД"/> </div>				
<table border="1"> <tr> <td>Отношение С/Ш на трассе Земля-Борт</td> <td>16.428</td> <td>дБ</td> </tr> </table>		Отношение С/Ш на трассе Земля-Борт	16.428	дБ
Отношение С/Ш на трассе Земля-Борт	16.428	дБ		
<table border="1"> <tr> <td>Отношение С/Ш на трассе Борт-Земля</td> <td>6.524</td> <td>дБ</td> </tr> </table>		Отношение С/Ш на трассе Борт-Земля	6.524	дБ
Отношение С/Ш на трассе Борт-Земля	6.524	дБ		
<table border="1"> <tr> <td>Отношение С/Ш на трассе Земля-Борт-Земля</td> <td>6.102</td> <td>дБ</td> </tr> </table>		Отношение С/Ш на трассе Земля-Борт-Земля	6.102	дБ
Отношение С/Ш на трассе Земля-Борт-Земля	6.102	дБ		

Рисунок А.2 – Вікно результатів обчислень

Вікно результатів обчислень поділено на дві частини. У верхній розташовано результати розрахунку з передачі сигналу із ЗС, а в нижній – з приймання сигналу ЗС. В окрему групу винесено розраховані значення відношення сигнал/шум, дБ, на трасах "земля-борт", "борт-земля і "Земля-борт-земля". Як і в головному вікні, у вікні результатів обчислень розташована група службових кнопок, що забезпечують перехід до головного вікна програми, виклик допомоги, роздрукування результатів розрахунку і вихід з програми.

### 3 Використовування вбудованої довідкової системи

Для полегшення роботи з програмою в неї вбудована контекстна довідкова служба Windows. У ній міститься опис роботи з програмою, рекомендації з настроювання і необхідні додаткові дані. Для виклику довідкової служби необхідно натискати кнопку "Помощь" або функціональну клавішу F1.