

УДК 621.396

Частотно-территориальное планирование системы подвижной спутниковой связи с зональным обслуживанием

К.А. Гениатулин, В.И. Носов

В настоящей статье проведено исследование влияния помех по боковым лепесткам цифровой антенной решётки, используемой на геостационарном спутниковом ретрансляторе для связи с подвижными абонентскими терминалами, на частотно-территориальное планирование в зависимости от размерности кластера. Проведён расчёт линии связи и определено значение сигнал/шум на входе приёмника абонентского терминала с учётом помех по боковым лепесткам.

Ключевые слова: системы спутниковой связи с зональным обслуживанием; многолучевая цифровая антенная решётка; оптимальное частотно-территориальное планирование; метод координационных колец; боковые лепестки.

1. Введение

В условиях постоянного роста спектра услуг, предоставляемых системами подвижной спутниковой связи (СПСС), увеличивающегося объёма передаваемых данных, стремительного роста требований к скоростям их передачи, вопросы эффективного распределения частотного ресурса встают наиболее остро. При жёстко ограниченном диапазоне частот, выделяемом для СПСС, а также не менее высоких требованиях к энергетике линий связи, используются различные способы обеспечения эффективного множественного доступа к спутниковому ретранслятору (СР). Среди них широко применяется построение систем с зональным обслуживанием, которое позволяет повторно использовать частоты при пространственном разнесении совмещённых каналов.

В целях наиболее эффективной реализации системы спутниковой связи с зональным обслуживанием целесообразно применение на спутниках многолучевых антенн с узкими лучами. Наиболее перспективным способом реализации таких антенн является применение технологий цифрового диаграммообразования с использованием цифровых антенных решёток (ЦАР). Реализация ЦАР основана на передовых алгоритмах цифровой обработки сигналов. Цифровое образование диаграммы направленности (ДН) антенны обеспечивает формирование множественных узких, независимо настраиваемых и динамически перенастраиваемых лучей, позволяет оптимально распределять энергетический и частотный ресурс в зависимости от динамического изменения нагрузки в зонах обслуживания [1, 2].

2. Диаграмма направленности антенной решётки

В целях формирования зоны обслуживания лучей ЦАР рассмотрим свойства диаграммы направленности (ДН) антенной решётки (АР).

Для плоской эквидистантной АР размером $M \times N$ нормированная ДН одного луча определяется выражением:

$$F(u, v) = \frac{1}{M \cdot N} \left| \frac{\sin\left(\frac{M \pi d_x}{\lambda} u\right)}{\sin\left(\frac{\pi d_x}{\lambda} u\right)} \right| \cdot \left| \frac{\sin\left(\frac{N \pi d_y}{\lambda} v\right)}{\sin\left(\frac{\pi d_y}{\lambda} v\right)} \right|, \quad (1)$$

где $u = \sin \theta \cos \varphi - \sin \theta_0 \cos \varphi_0$, $v = \sin \theta \sin \varphi - \sin \theta_0 \sin \varphi_0$,

θ_0 и φ_0 – направление максимума главного лепестка ДН луча,

d_x и d_y – расстояние между элементами по оси X и по оси Y соответственно (рис. 1).

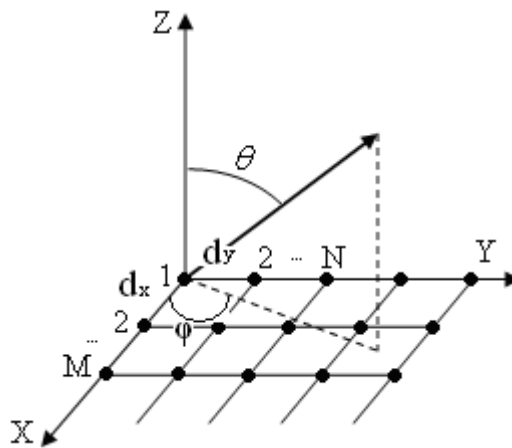


Рис. 1. Двумерный массив излучателей из $M \times N$ элементов

Рассмотрим более подробно диаграмму направленности АР с размерностью 100×100 элементов. Расстояние между элементами примем равным половине длины волны ($d = 0.5\lambda$, где $\lambda = 0.2$ м, что соответствует частоте 1.5 ГГц). Дифракционные максимумы при таком d отсутствуют [3]. Ширина главного лепестка на уровне половинной мощности составляет 1° . Физическая ширина и длина такой антенной решётки составит 10 м.

Для учёта уровня боковых лепестков ДН удобно использовать термин *sidelobe ratio* (SLR): отношение амплитуды бокового лепестка к амплитуде основного лепестка ДН, измеряемое в децибелах [4]. Значения SLR, полученные на основе зависимости нормированной ДН в логарифмическом масштабе

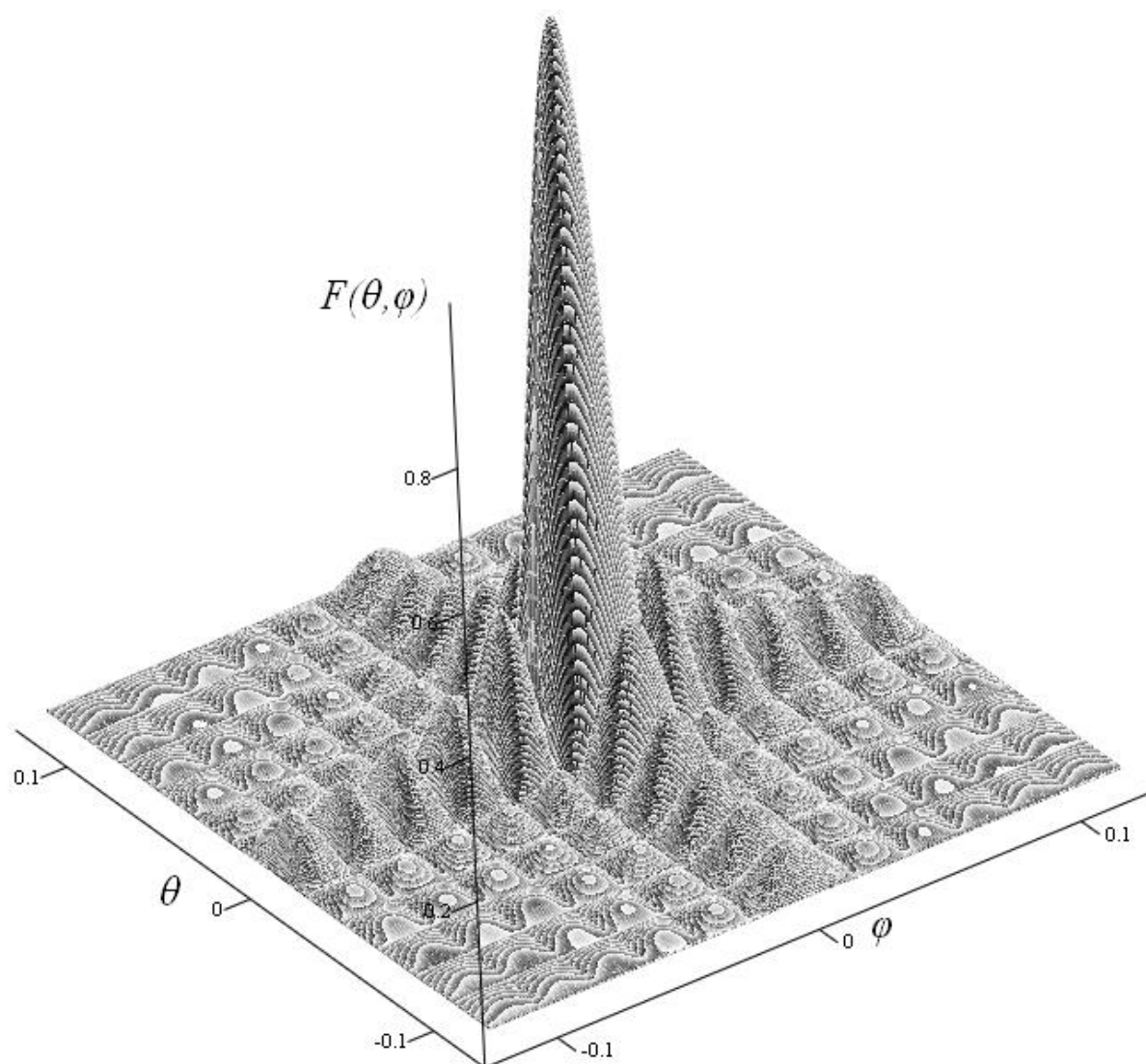
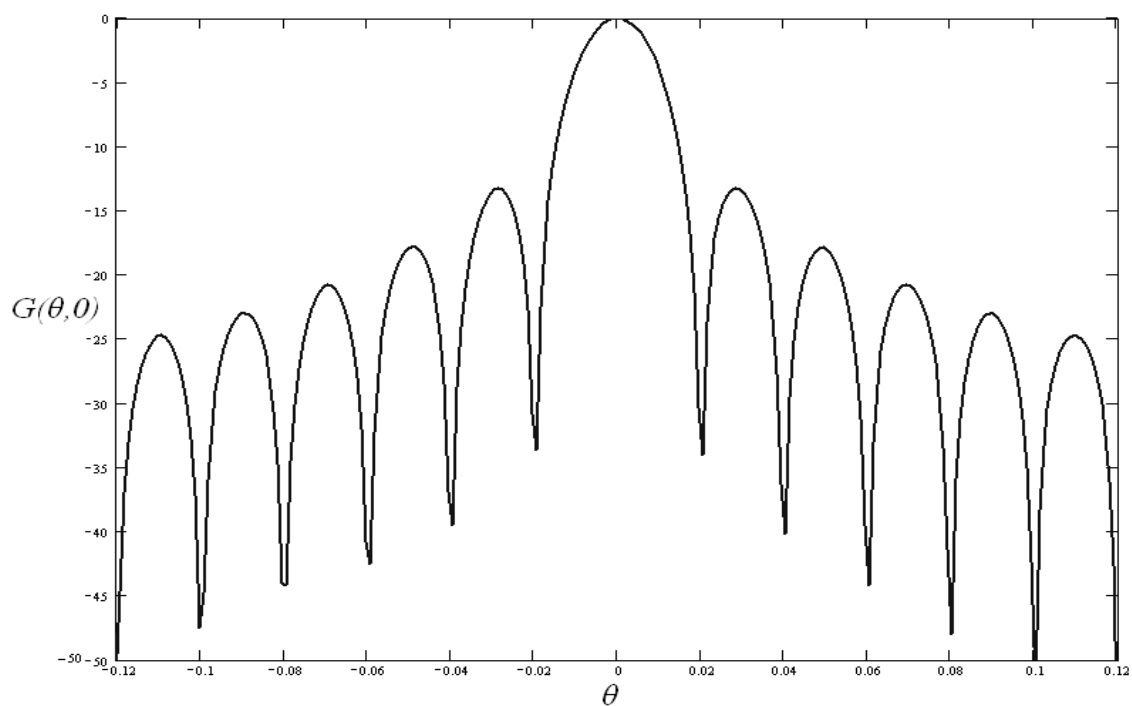
$$G(\theta, \varphi) = 20 \log(F(\theta, \varphi)), \quad (2)$$

приведены в табл. 1. Так как суммарный уровень первых пяти боковых лепестков превышает суммарный уровень следующих пяти боковых лепестков на 10 дБ, влиянием дальних лепестков (начиная с 6-го) можно пренебречь.

На основе выражения (1) с использованием математического пакета MathCAD построены диаграммы направленности АР. На рис.2 приведена двумерная ДН $F(\theta, \varphi)$ рассмотренной антенны, ограниченная первыми пятью боковыми лепестками (область от -6.9° до $+6.9^\circ$ по осям θ и φ). Нормированная ДН такой решётки в логарифмическом масштабе (выражение (2) при $\varphi = 0$), также ограниченная первыми пятью боковыми лепестками, приведена на рис. 3.

Таблица 1 – Отношение амплитуды боковых лепестков к главному лепестку диаграммы направленности

№ п/п	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
SLR	-13.5	-17.9	-20.8	-23	-24.7	-26.1	-27.4	-28.4	-29.4	-30.2

Рис. 2 График зависимости $F(\theta, \phi)$ Рис. 3 Диаграмма направленности антенной решётки 100×100 элементов на плоскости

Для нахождения ширины главного лепестка ДН, а также боковых лепестков необходимо найти нули ДН, которые можно определить, приравняв к нулю выражение (1) [3 – 8]. После выполнения преобразований уравнения $F(\theta, \varphi) = 0$, при $\varphi, \varphi_0, \theta_0 = 0$, получим:

$$\sin\left(\frac{\pi R d}{\lambda} \sin(\theta)\right) = 0, \text{ или } \frac{\pi R d}{\lambda} (\sin(\theta)) = \pi, 2\pi, \dots$$

Отсюда ширина главного лепестка ДН

$$BW_0 = 2 \arcsin\left(\frac{\lambda}{R d}\right). \quad (3)$$

Ширина боковых лепестков ДН:

$$\begin{aligned} BW_1 &= \arcsin\left(\frac{2\lambda}{R d}\right) - \arcsin\left(\frac{\lambda}{R d}\right), \\ BW_2 &= \arcsin\left(\frac{3\lambda}{R d}\right) - \arcsin\left(\frac{2\lambda}{R d}\right), \\ &\dots \\ BW_N &= \arcsin\left(\frac{(N+1) \cdot \lambda}{R d}\right) - \arcsin\left(\frac{N \cdot \lambda}{R d}\right). \end{aligned} \quad (4)$$

3. Влияние боковых лепестков на частотно-территориальное планирование

С использованием выражений (1 – 4), а также геометрических расчётов, приведённых в [5], смоделирована зона обслуживания одного луча рассмотренной антенной решетки, с учётом первых пяти боковых лепестков, для случая использования АР на геостационарном спутниковом ретрансляторе (СР).

На рис. 4 показана зона обслуживания главного лепестка ДН и зоны помех от боковых лепестков. Также приведены радиусы зон обслуживания и помеховых зон, расстояния между центрами зон.

На основе полученной модели зоны обслуживания одного луча ДН создана программная модель зоны обслуживания геостационарной ССС с многолучевой АР, с учётом боковых лепестков ДН. При этом использовалась однородная регулярная сотовая сеть гексагональной структуры (модуль сети, т.е. расстояние между центрами отдельных зон, $R_0 = \sqrt{3}R_s$, где R_s – радиус зоны обслуживания главного лепестка ДН) [9].

Обозначим множество зон обслуживания главных лепестков $M = \{m_1, m_2, \dots, m_i\}$, а множество помеховых зон от боковых лепестков – $S = \{s_1, s_2, \dots, s_j\}$. Каждая зона имеет координаты центра x, y , а также частоту f , которая ей присвоена:

$$\forall m_i : \{x_i, y_i, f_i\}, \forall s_j : \{x_j, y_j, f_j\}$$

Для каждого из элементов множества M находим такие элементы множества S , которым присвоен один и тот же частотный канал и которые пересекаются с этим элементом из множества M :

$$\forall i, x, y, \exists j, s_j \cap m_i, f_j = f_i, f_j \in s_j, f_i \in m_i \quad (5)$$

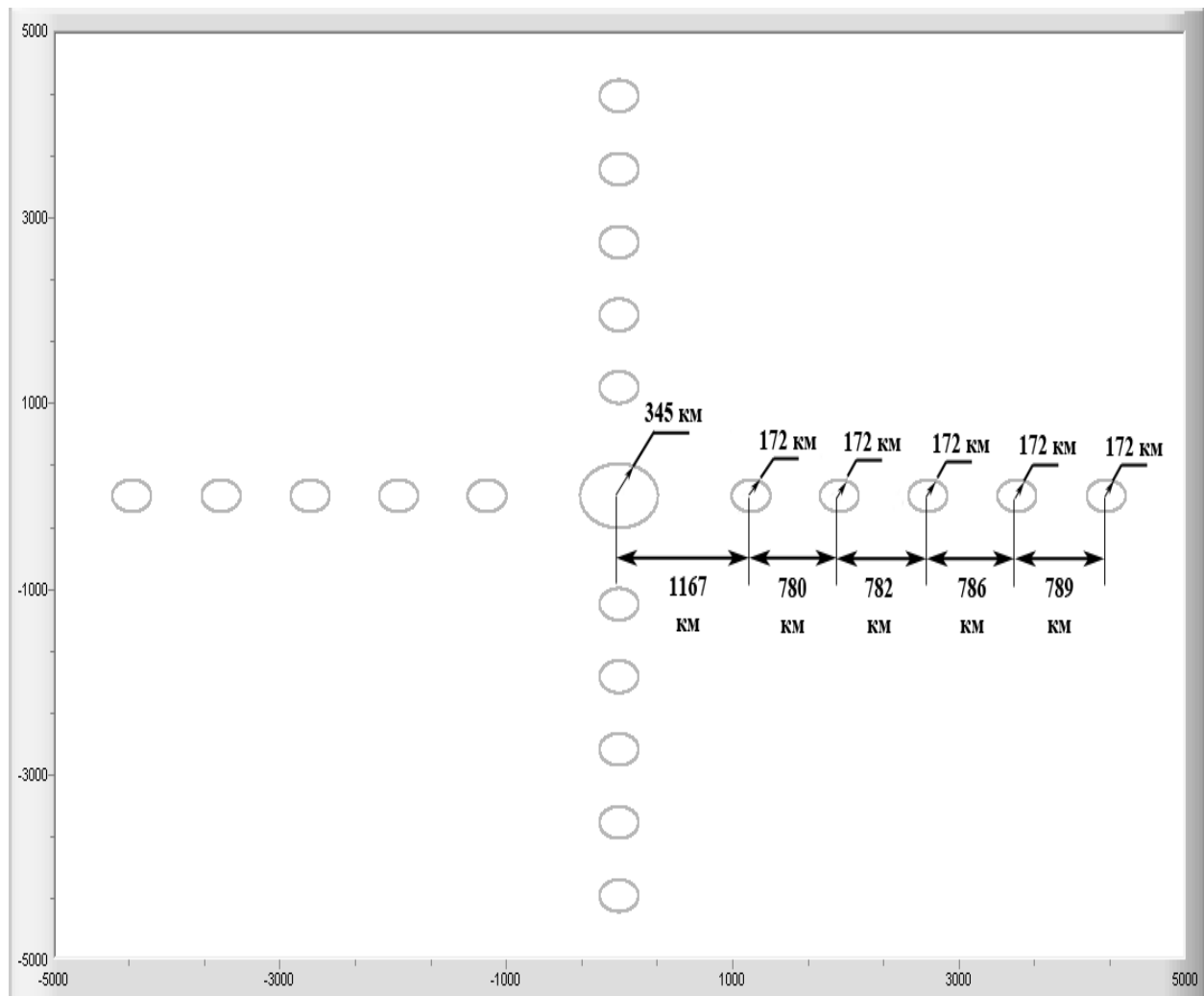


Рис. 4. Зона обслуживания и боковые лепестки одного луча плоской антенной решётки 100×100 элементов

После этого рассчитаем уровень боковых лепестков ДН всех лучей, работающих в совмещённом канале, относительно главного лепестка (находим итоговый SLR для зоны m_i):

$$SLR_{m_i} = 10 \lg \left(\sum_j 10^{SLR(s_j)/10} \right), \quad (6)$$

где $SLR(s_j)$ – отношение уровня бокового лепестка, создающего помеху s_j , к уровню главного лепестка ДН.

В результате моделирования на основе выражений (5) и (6) было проведено исследование зависимости SLR зоны обслуживания от размерности кластера $C_{кл}$. В табл. 2 приведены максимальные значения $SLR = \max SLR_{m_i}$ в зависимости от размерности кластера $C_{кл}$.

Таблица 2 – Соотношения между уровнями помех по боковым лепесткам и размерностью кластера

Размерность кластера, $C_{кл}$	SLR
4	-7.5
9	-12.9
12	-13.1

Из приведённой таблицы видно, что с ростом размерности кластера помехи от боковых лепестков уменьшаются, так как число лучей, работающих на одной частоте, уменьшается.

На рис. 5. приведён пример построенной зоны обслуживания при размерности кластера $C_{кл} = 9$ с указанием значений SLR и номеров присвоенных частотных каналов (в скобках) [9 – 11].

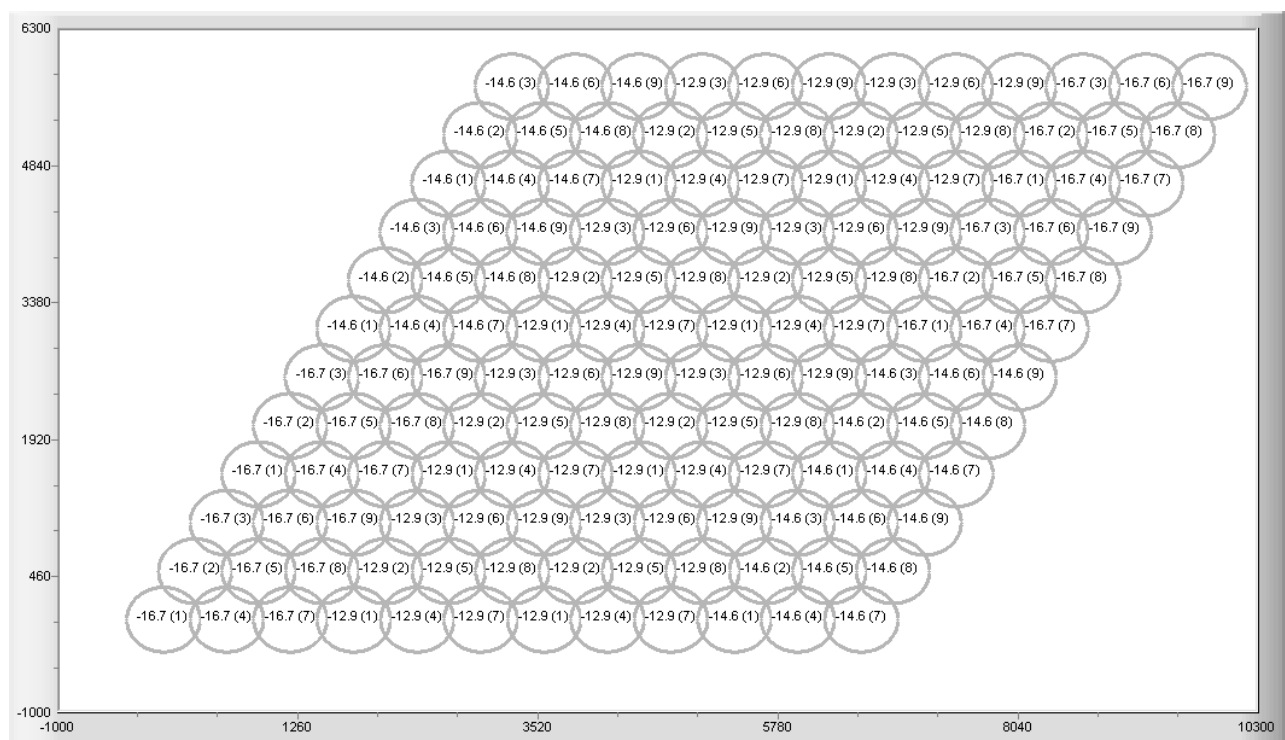


Рис. 5. Зона обслуживания и уровни помех от боковых лепестков многолучевой антенной решётки при размерности кластера 9

4. Расчет линии связи

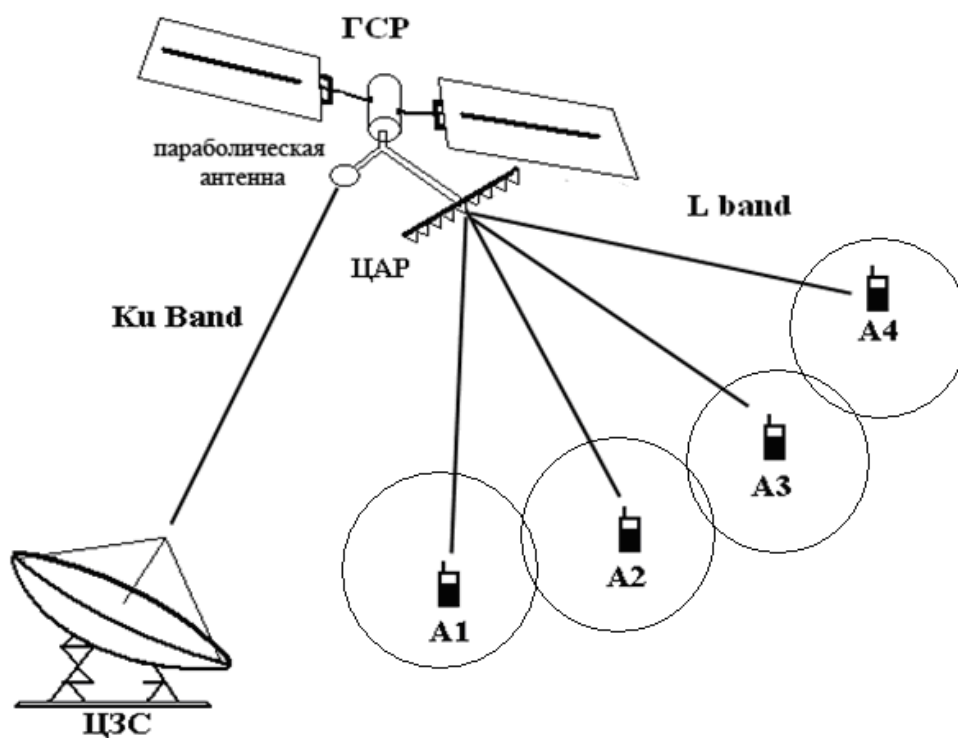


Рис. 6 Схема связи СПСС

На рис. 6. приведён вариант схемы связи через геостационарный спутниковый ретранслятор. Так, связь с наземными подвижными абонентскими терминалами осуществляется через бортовую ЦАР в L диапазоне частот $f = 1.5$ ГГц. Каждый луч ЦАР формирует зону обслуживания радиусом 345 км. Внутри зоны обслуживания множественный доступ для абонентов осуществляется за счёт применения эффективного кодирования. Магистральный канал обеспечивается через связь с центральной земной станцией в Ku диапазоне частот $f = 12$ ГГц, с применением традиционной параболической антенны.

Рассмотрим энергетику линии связи между двумя абонентскими терминалами. Допустим, что оба абонентских терминала находятся в пределах г. Новосибирска (табл. 3), а спутниковый ретранслятор выведен на геостационарную орбиту $\lambda_s = 90^\circ$ в.д.

Таблица 3 – Местоположение абонентских терминалов

φ_{ES}	55°02'00" с.ш.	Географическая широта и долгота места расположение абонентов (г. Новосибирск)
λ_{ES}	82°55'00" в.д.	

В табл. 4 приведены принятые для расчёта линии связи параметры спутникового ретранслятора (СР) и абонентского терминала (АТ).

Таблица 4 – Исходные параметры для расчёта линии связи

Параметр	Значение	Наименование
f_{UP}	1650 МГц	Частота радиосигнала на линии вверх
f_{DN}	1550 МГц	Частота радиосигнала на линии вниз
Параметры спутникового ретранслятора		
$EIRP_{sat}$	56 дБВт	Максимальная изотропная излучаемая мощность в луче СР
G/T_{sat}	13 дБ/°К	Добротность приёмника СР
T_{sat}	500 °К	Эквивалентная шумовая температура приёмника СР
P_{sat}	40 Вт	Мощность сигнала в луче СР
G_{sat}	40 дБ	Коэффициент усиления приёмной антенны СР
SLR	-12.9 дБ	Отношение уровня помех по боковым лепесткам к главному лепестку ДН ($C_{кл} = 9$, см. табл. 2)
Параметры абонентского терминала		
$EIRP_{term}$	8.5 дБВт	Максимальная изотропная излучаемая мощность абонентского терминала
G/T_{term}	-24.9 дБ/°К	Добротность приёмника абонентского терминала
T_{term}	553 °К	Эквивалентная шумовая температура приёмника абонентского терминала
P_{term}	2 Вт	Мощность передатчика абонентского терминала
G_{term}	2.5 дБ	Коэффициент усиления антенны абонентского терминала

Расчёт линии вверх. Мощность сигнала на входе приёмника спутникового ретранслятора определяется формулой

$$P_{term} = \frac{EIRP_{term} \cdot G_{sat}}{L_{up} \cdot L_a},$$

где L_{up} – затухание сигнала в свободном пространстве на линии вверх,
 L_a – дополнительные потери мощности в атмосфере.

Затухание сигнала в свободном пространстве определяется по формуле

$$L = \left(\frac{4\pi fd}{c} \right)^2, \quad (7)$$

где f – частота сигнала, c – скорость света, d – наклонная дальность.

С учётом выбранного местоположения проведём расчёт наклонной дальности от СР до абонента (рис. 7) по формуле

$$d = \sqrt{R_s^2 + R_e^2 - 2R_s R_e \cos \gamma} = \sqrt{R_s^2 + R_e^2 - 2R_s R_e \cos \varphi_{es} \cos(\lambda_s - \lambda_{es})} = 38890 \text{ км},$$

где R_e – радиус Земли, R_s – радиус орбиты СР.

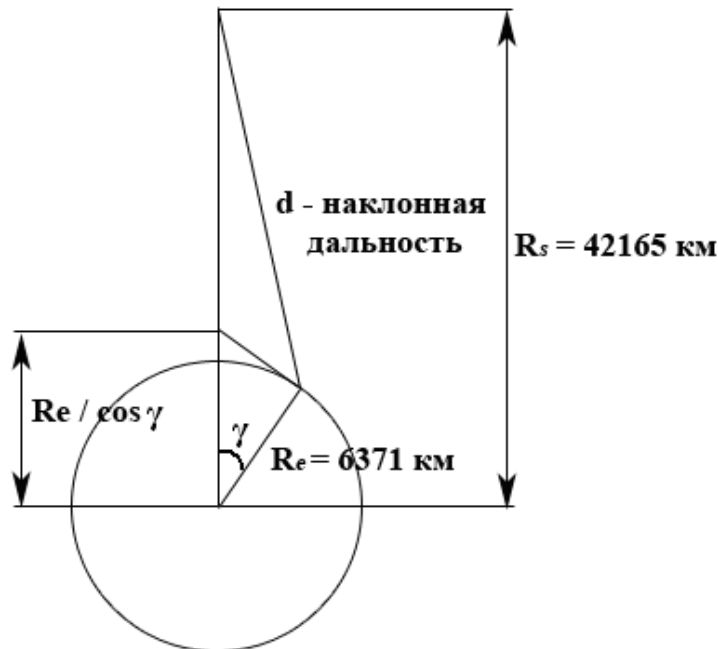


Рис. 7. Наклонная дальность

С использованием найденного d , из выражения (7) получаем $L_{up} = 189.047 \text{ дБ}$.

Дополнительные потери мощности сигнала L_a , обусловленные поглощением радиоволн в атмосфере, зависят от используемой частоты, угла места земной станции, климатических условий и т.д. Их значение может варьироваться в пределах от 1.5 дБ до 6 дБ [12]. В данном расчёте примем значение $L_a = 2 \text{ дБ}$.

Шум на входе ЦАР СР определяется по формуле

$$N_{sat} = k \cdot B \cdot T_{sat},$$

где k – константа Больцмана, B – ширина полосы частот, занимаемая сигналом.

Для модуляции QPSK с позиционностью $M = 4$ полоса частот при скорости передачи данных $R = 512 \text{ Кбит/с}$ равна

$$B = \frac{R}{\log_2 M} = 256 \text{ КГц}.$$

Общее значение сигнал/шум на линии вверх определяется выражением

$$\left(\frac{P}{N}\right)_{up} = \frac{P_{term}}{N_{sat}}.$$

Расчёт линии вниз. Мощность сигнала, передаваемого в луче СР, определяется формулой

$$P_{sat} = \frac{EIRP_{sat} \cdot G_{term}}{L_{dn} \cdot L_a},$$

где $L_{dn} = 188.504$ дБ (7).

Шум на входе антенны абонентского терминала

$$N_{term} = k \cdot B \cdot T_{term}.$$

Для того чтобы на линии вниз учесть влияние боковых лепестков на помехозащищённость системы, определяем мощность помехи от боковых лепестков ЦАР СР по формуле

$$P_{sidelobe} = 10^{10 \log(P_{sat}) + SLR/10}$$

Тогда отношение сигнал/шум на линии вниз с учетом влияния боковых лепестков ДН ЦАР

$$\left(\frac{P}{N}\right)_{dn} = \frac{P_{sat}}{N_{term} + P_{sidelobe}}.$$

Таким образом, результирующее отношение сигнал/шум с учётом обеих линий определяется выражением

$$SIR = \left\{ \left(\frac{P}{N}\right)_{up}^{-1} + \left(\frac{P}{N}\right)_{dn}^{-1} \right\}^{-1}.$$

При заданных параметрах спутниковой системы передачи (табл. 4), скорости передачи $B = 256$ кГц и модуляции QPSK при размерности кластера $C_{кл} = 9$ значение отношения сигнал/шум SIR с учётом помех по боковым лепесткам равняется 4.37 дБ (без учёта боковых лепестков – +5.03 дБ). А при размерности кластера $C_{кл} = 4$, с учётом помехи по боковым лепесткам, результирующее значение SIR уменьшается и составляет 3 дБ. При модуляции QPSK для получения вероятности ошибки $p_{ош} = 10^{-3}$ необходимо обеспечить на входе приёмника отношение сигнал/шум 10 дБ [9], поэтому для обеспечения работы спутниковой линии связи при размерности кластера $C_{кл} = 9$ необходимо применить избыточное кодирование с энергетическим выигрышем кода, равным ЭВК = $10 - 4.37 = 5.63$ дБ. Такое значение ЭВК может быть достигнуто при использовании каскадного кодирования [9]. При размерности кластера $C_{кл} = 4$ обеспечение ЭВК = $10 - 3 = 7$ дБ становится проблематичным, и в этом случае необходимо либо снизить скорость передачи данных, либо использовать модуляцию с меньшей позиционностью, в данном случае – BPSK [9, 12 – 14].

5. Заключение

В данной статье проанализирована диаграмма направленности плоской антенной решётки размером 100×100 элементов. С использованием полученных зависимостей проведено моделирование зоны обслуживания одного луча антенной решётки и его помеховых зон от боковых лепестков.

На основе однородной регулярной сотовой сети гексагональной структуры и полученной модели для луча антенной решётки построена зона обслуживания многолучевой ЦАР. Получены аналитические выражения для определения суммарного влияния боковых лепестков антенны на помехозащищённость системы. На основе этих выражений проведено исследование зависимости размерности кластера от уровня помех по боковым лепесткам от лучей, работающих на совпадающих частотах.

Проведён расчёт линии связи между двумя наземными терминалами ССС через ЦАР с учётом рассмотренной помехи по боковым лепесткам, а также без неё. Полученные результаты расчётов энергетики линии связи показали, что при частотно-территориальном планировании необходимо учитывать помеху по боковым лепесткам ДН ЦАР.

В дальнейшем, на основании разработанной модели зоны обслуживания ЦАР СР, планируется исследовать оптимальное частотно-территориальное планирование в системе спутниковой связи с использованием метода координационных колец [10], в зависимости от позиционности модуляции, скорости передачи данных, энергетических параметров ССС. Кроме того, целесообразно исследовать эффект от применения различной поляризации в зонах обслуживания, а также технологий активного подавления помех в ЦАР.

Литература

1. Кантор Л.Я. Расцвет и кризис спутниковой связи // Электросвязь. 2007. №7. С. 19-23.
2. Слюсар В.И. SMART-антенны пошли в серию // Электроника: НТБ. 2004. №2. С. 62-65.
3. Гениатулин К.А., Носов В.И., Планирование систем спутниковой связи с зональным обслуживанием // Вестник СибГУТИ : научный журнал. – Новосибирск : 2009, № 4. С. 11-22.
4. R. C. Hansen, Phased Array Antennas. New York: John Willey & Sons, 2001 – 489 с.
5. B. El-Jabu and R. Steele, "Cellular communications using aerial platforms," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 50, pp. 686-700, May 2001.
6. Гениатулин К.А., Носов В.И., Влияние боковых лепестков диаграммы направленности цифровой антенной решётки на частотно-территориальное планирование / Информатика и проблемы телекоммуникаций: материалы российской научно-практической конференции, том 1 / Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. – Новосибирск : 2010 С. 408-409.
7. C. A. Balanis, Antenna Theory: Analysis and Design. Second Edition. New York: John Willey & Sons, 1997 – 941с.
8. Мозинго Р.А, Миллер Т.У. Адаптивные антенные решётки: Введение в теорию: Пер. с англ. – М.: Радио и связь, 1986. – 448 с., ил.
9. В.И. Носов. Эффективность секторных антенн и методов модуляции в сетях радиосвязи: Монография / СибГУТИ. – Новосибирск, 2008 г., - 235 с.
10. Методы частотно-территориального планирования в сетях радиосвязи: монография / В.И. Носов, Н.В. Носкова; Сиб. гос. ун-т телекоммуникаций и информатики. – Новосибирск: 2006. - 162с.
11. Зюзьков В.М. Математическая логика и теория алгоритмов: Учебное пособие для вузов 2-е изд. / Зюзьков В.М., Шелупонов А.А – М.: Горячая линия – Телеком, 2007. – 176 с.
12. Дятлов А.П. Системы спутниковой связи с подвижными объектами: Учебное пособие. Ч.1. Таганрог. ТРТУ. 1997. 95 с.
13. Спутниковая связь и вещание: Справочник. – 3-е изд., перераб. и доп. / В.А. Бартенев, Г.В. Болотов, В.Л. Быков и др.; Под ред. Л.Я. Кантора. – М.: Радио и связь, 1997. – 528с.: ил.
14. Анпилогов В.Р. Спутники связи и вещания нового поколения (обзор тенденций развития) // Специализированное издание "Спутниковая связь и вещание". 2009. С. 28-35

Статья поступила в редакцию 7.02.2011

Гениатулин Константин Агзамович

аспирант СибГУТИ, офицер войсковой части 48840, старший лейтенант
тел. (383) 269-82-54, e-mail: genkos@mail.ru

Носов Владимир Иванович

доктор технических наук, профессор, заведующий кафедрой систем радиосвязи СибГУТИ
тел. (383) 269-82-54, e-mail: nvi@sibsutis.ru

Frequency-spatial planning of mobile satellite communication system with zone service

K.A. Geniatulin, V.I. Nosov

The side lobe noise effect of the digital antenna array used by the geostationary satellite transponder for communications with mobile user terminals on the frequency-spatial planning depending on the dimension of the cluster is studied in this paper. The calculation of communication link power is made, the value of signal to noise ratio at the receiver input of the user terminal based on the interference side lobes is determined.

Keywords: satellite communication systems with zone service, digital multi-beam antenna array, optimal frequency-spatial planning, coordination rings method.