ЭФФЕКТИВНОСТЬ ИСПОЛЬЗОВАНИЯ РЧС

УДК 621.396.93

ОЦЕНКА НЕКОТОРЫХ МЕТОДОВ ПРЕОДОЛЕНИЯ ДЕФИЦИТА ЧАСТОТНОГО РЕСУРСА ГЕОСТАЦИОНАРНОЙ ОРБИТЫ

Л. Я. Кантор, главный научный сотрудник НИИР, д.т.н.; levkantor@rambler.ru
М. В. Мысев, научный сотрудник НИИР
М. В. Прокопьев, сотрудник НИИР

***Ключевые слова**: геостационарная орбита, орбитально-частотный ресурс.*

Введение. Геостационарная орбита (ГСО) представляет собой уникальный, принципиально ограниченный и невосполнимый ресурс для систем спутниковой связи [1]. Перегруженность ГСО спутниками связи и вещания стала серьезным фактором, ограничивающим развитие этих систем [2]. Серьезность проблемы заставила Бюро радиосвязи Международного союза электросвязи провести семинар по этой проблеме [3].

Сегодня имеет место не только формальная, бумажная перегрузка из-за огромного числа не всегда реализуемых заявок, препятствующих регистрации новых систем, но и практически полная насыщенность орбитально-частотного ресурса ГСО реально работающими на орбите спутниками (разумеется, это касается наиболее подходящих для спутниковой связи и разрешенных Регламентом радиосвязи [4] полос частот). Поэтому сейчас важны скорее технические и регламентарные меры, способствующие увеличению реальной совокупной пропускной способности систем связи на ГСО, нежели меры по облегчению процедур координации и регистрации, на что до сих пор обращалось наибольшее внимание. Настоящая статья посвящена количественной оценке некоторых методов увеличения емкости ГСО.

Улучшение диаграммы направленности антенн земных станций. Одной из простейших, наиболее очевидных технических мер, направленных на увеличение емкости ГСО, является повышение пространственной избирательности антенн земных станций (ЗС). При этом обычно руководствуются двумя эталонными формулами для огибающей боковых лепестков диаграммы направленности (ДН) [5, 6]:

$$G_1(\varphi) = 29 - 25\lg\varphi \qquad (1)$$

и

$$G_2(\varphi) = 32 - 25\lg\varphi,$$

где G_i — усиление относительно изотропной антенны, дБи; φ — угол отклонения от оси главного луча ДН, град.

Предположив, что все антенны ЗС сконструированы согласно одной из рекомендаций МСЭ, можно получить количественную оценку выигрыша в пропускной способности орбиты, который дает применение антенн, соответствующих (1). Расчет велся при простейшем условии, что все спутниковые системы на ГСО обладают одинаковыми техническими характеристиками; в качестве варьируемых параметров использовались отношение сигнал/помеха *C/I* и усиление антенны.

В табл. 1 показано, какое количество спутниковых систем теоретически можно разместить на ГСО, применяя антенны, соответствующие одной из указанных рекомендаций.

Очевидно, что выигрыш достаточно велик — до 87 дополнительно размещаемых систем. Следовательно, переход к обязательному применению антенн с большей пространственной избирательностью актуален. Отметим также, что при уменьшении отношения *C/I* выигрыш от использования более совершенных антенн ЗС возрастает.

Из табл. 1 также видно, какой существенный выигрыш достигается при снижении нормативного отношения сигнала к помехе *C/I*. Увеличение допустимого значения взаимных помех между спутниковыми сетями — неизбежное направление модификации действующих ограничений.

Наконец, таблица демонстрирует влияние изменения размеров антенн ЗС на число спутников, размещаемых на ГСО. Очевидно, что уменьшение этих антенн (тенденция, оправдываемая экономическими соображениями) приводит к ограничению доступа новых систем к ресурсу ГСО.

Влияние приближения систем к однородности. Для количественной оценки эффекта увеличения орбитально-частотного ресурса за счет применения однородных параметров спутниковых систем был проведен расчет электромагнитной совместимости систем радиовещательной спутниковой службы, заявленных в МСЭ на координацию в полосе

Таблица 1

Параметр и результаты расчета	G_{max}, дБ								
	41,9			46,4			49,0		
	D, м								
	1,2			2,0			2,7		
C/I, дБ	20	25	30	20	25	30	20	25	30
Расчет по Рек. МСЭ-R S.580	187	118	75	283	179	113	360	227	143
Расчет по Рек. МСЭ-R S.465	142	90	57	215	136	86	273	172	109
Выигрыш в числе систем на ГСО по S.580	45	29	18	68	43	27	87	55	35

Примечание. При f = 11 ГГц.

частот 21,4—22 ГГц на дуге геостационарной орбиты 36° в.д. ±8°. Определялся известный показатель увеличения эквивалентной шумовой температуры спутниковой линии, который обусловлен помехами ($\Delta T/T$). Критерием для оценки такого ухудшения служит пороговая величина, составляющая 6 % [7]. При расчете $\Delta T/T$ использовался пакет официального программного обеспечения Бюро радиосвязи GIBC.

Необходимо принять во внимание, что расчет помех между спутниковыми сетями, заявленными от одного государства, программой не осуществляется. Анализ совместимости для 26 спутниковых сетей проводился по принципу «каждая на каждую» — всего 546 дуальных расчетов. Результаты расчета (табл. 2, строка **A**) показали очевидную потенциальную несовместимость подавляющего большинства заявленных систем.

Затем был выполнен расчет для тех же систем, но с измененными исходными данными. Для каждой спутниковой системы были установлены следующие значения:

- одинаковый коэффициент усиления приемной антенны ЗС — 40,5 дБ (соответствует диаметру антенны 0,6 м);
- одинаковая температура шума приемного тракта ЗС — 180 К;
- одинаковое отношение сигнал/шум (*C/N*) на входе демодулятора ЗС, равное 20 дБ (при ясной погоде);
- ДН приемной антенны ЗС — Приложение 8 Регламента радиосвязи.

Таким образом, параметры анализируемых спутниковых систем стали более однородны.

При принятом отношении *C/N* была рассчитана необходимая мощность спутникового ретранслятора для каждой космической станции в условиях «ясного неба». Как следует из результатов расчета (табл. 2, строка **B**), количество потенциально совместимых спутниковых систем увеличилось примерно вдвое по сравнению с расчетом при заявленных параметрах систем.

В строке **C** табл. 2 приведены результаты более строгого расчета: необходимая мощность бортового ретранслятора определялась с учетом затухания радиосигнала при распространении в атмосфере. Было принято допущение, что вероятность, при которой отношение *C/N* не ниже 14 дБ, гарантируется в течение 99,7 % времени худшего года. Уровень затухания рассчитывался для каждой спутниковой станции в месте расположения столицы государства, заявившего спутниковую сеть, в соответствии с методиками [8, 9]. Анализ показал незначительное снижение количества совместимых спутниковых систем в сравнении с предыдущим значением.

Ограничение зоны обслуживания. Этот вариант расчета проводился для тех же систем радиовещательной спутниковой службы с заявленными параметрами (т.е. так же, как для строки **A** табл. 2), но заявленная зона обслуживания всех систем была ограничена национальной территорией, а зона покрытия определялась размерами минимального эллипса, построенного по границам национальной территории, с ослаблением 3 дБ. В качестве примера на рис. 1 показаны заявленные Администрацией связи Франции зоны обслуживания и покрытия для сети Eutelsat-B1—29E, а на рис. 2 — зоны обслуживания и покрытия, ограниченные национальной территорией Франции. Анализ показал потенциальную совместимость подавляющего большинства систем (76,7 %): строка **D** в табл. 2.

Очевидно, что получившая распространение практика заявления огромных территорий в качестве зон обслуживания и покрытия, а также отсутствие в Регламенте радиосвязи реальных ограничений для такой практики входят в чис-

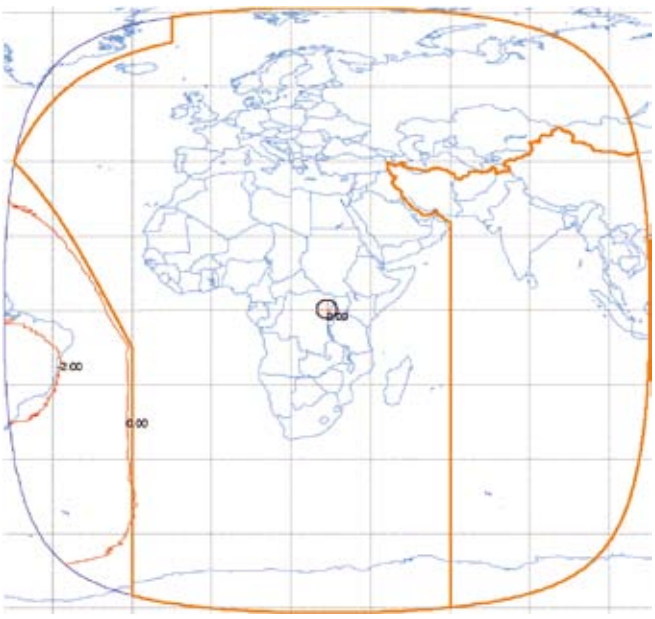

Рис. 1

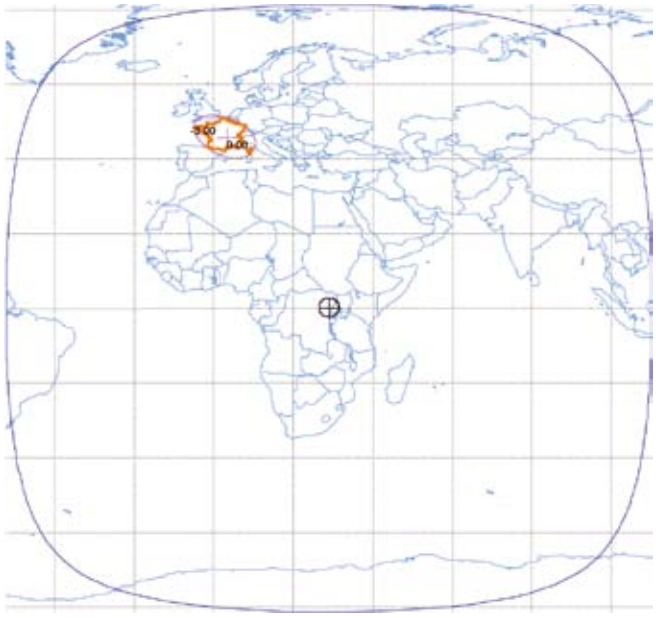

Рис. 2

Таблица 2

Условия расчета	Общее число проведенных расчетов	$\Delta T/T > 6\,\%$	$\Delta T/T < 6\,\%$
A. Текущая ситуация по запросам на координацию (расчет с заявленными параметрами)	546,0	90,7 %	9,3 %
B. $D_{а_{зс}}$ = 0,6 м, *C/N* = 20 дБ, $T_{ш_{зс}}$ = 180 К	415,00	82,9 %	17,1 %
C. $D_{а_{зс}}$ = 0,6 м, *C/N* = 14 дБ (с учетом ослабления сигнала в атмосфере), $T_{ш_{зс}}$ = 180 К	415,00	85,5 %	14,5 %
D. Расчет с заявленными параметрами, но ограниченными зонами покрытия	546,0	23,3 %	76,7 %

ло главных причин перегрузки ГСО. К сожалению, никаких реальных ограничений для подачи таких глобальных заявок Регламент радиосвязи сегодня не содержит, а призывы общего характера юридической силы не имеют.

Применение критерия *C/I* вместо Δ*T/T*. Превышение установленного порога ($\Delta T/T > 6\,\%$) означает лишь возможную несовместимость рассматриваемых систем и служит основанием для дальнейшего анализа — расчета отношения *C/I* [4]. Расчет *C/I*, дБ, позволяет более точно оценить электромагнитную совместимость спутниковых систем:

$$C/I = C/N - 10\lg(\Delta T/T), \qquad (2)$$

где C — уровень полезного сигнала на выходе приемной антенны ЗС, дБ; N — спектральная плотность мощности теплового шума приемного тракта ЗС, дБ; ΔT — кажущееся увеличение шумовой температуры приемной системы полезной ЗС, вызванное мешающим излучением, на выходе приемной антенны этой станции, К; T — эквивалентная шумовая температура спутниковой линии, К.

Из (2) видно, что при высоком отношении *C/N* необходимое отношение *C/I* может обеспечиваться даже при неудовлетворительном (высоком) значении Δ*T/T*.

В табл. 3 показана доля случаев, когда $\Delta T/T > 6\,\%$, но отношение *C/I* лучше установленного критерия. Так, например, при использовании критерия *C/I* =14 дБ около 18 % потенциально несовместимых (по Δ*T/T*) систем с заявленными параметрами оказываются совместимыми. При использовании критерия *C/I* > 20 дБ таких систем около 9 %. Особенно большой эффект от применения критерия *C/I* достигается при приближении систем к однородности (строки **B, C** табл. 3).

Таблица 3

Условия расчета	*C/I* > 14 дБ при Δ*T/T* > 6 %	*C/I* > 20 дБ при Δ*T/T* > 6 %
A. Текущая ситуация по запросам на координацию	18,2 %	8,7 %
B. $D_{азс}$ = 0,6 м, *C/N* = 20 дБ, $T_{шзс}$ = 180 К	70,6 %	54,4 %
C. $D_{азс}$ = 0,6 м, *C/N* = 14 дБ (с учетом ослабления сигнала в атмосфере), $T_{шзс}$ = 180 К	49,6 %	22,8 %
D. Расчет с заявленными параметрами, но ограниченными зонами покрытия	25,2 %	15 %

Оценка зависимости пропускной способности ГСО от усиления антенн ЗС. Очевидно, что при уменьшении углового разноса между соседними спутниками увеличивается число систем, которые можно разместить на орбите. Однако при этом возрастают взаимные помехи между системами, что ведет к снижению пропускной способности каждой из них. Интересно выяснить, существует ли оптимальное значение углового разноса между соседними спутниками, при котором суммарная пропускная способность всех систем на ГСО достигает максимума.

Оценку потенциальной пропускной способности ГСО в зависимости от размеров антенны ЗС и углового разноса между соседними спутниками θ производим при упрощающих анализ допущениях.

1. Все системы связи однородны и имеют одинаковую потенциальную пропускную способность, определяемую формулой Шеннона.

2. Собственные шумы каждой системы $N_ш$ пренебрежимо малы по сравнению с помехами I между сетями спутниковой связи, т. е. $N_ш + I \approx I$, и пропускная способность каждой системы определяется отношением *C/I*, где C — мощность полезного сигнала.

3. Помехи учитываются только на линии вниз («космос — Земля»).

4. Зоны покрытия соседних (1- и 2-й пар) спутников перекрываются, вследствие чего необходимый угловой разнос между ними зависит только от избирательности антенн ЗС, определяемой формулой (1), тогда как пространственная избирательность бортовых антенн не учитывается.

5. Антенны ЗС характеризуются их усилением, что позволяет применить результаты к любому сочетанию D/λ.

При этих предположениях потенциальная пропускная способность ГСО (на единицу полосы и времени), бит/с·Гц:

$$\varepsilon_{гсо} = k\log_2\left(1+\frac{C}{I}\right);$$

$$k = 360/\theta,$$

где k — число систем связи, размещающихся на всей ГСО; θ — угловой разнос между соседними спутниками.

Потенциальная пропускная способность ГСО на градус дуги:

$$\varepsilon = \varepsilon_{гсо}/360.$$

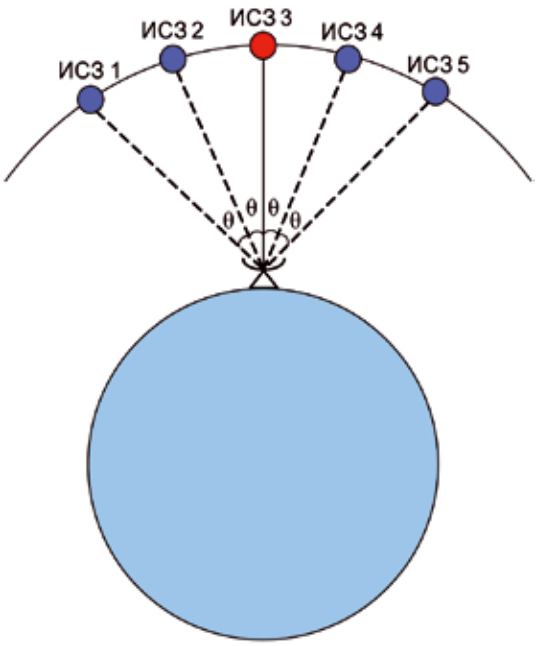

Рис. 3

Отношение *C/I* будем оценивать в предположении, что на каждую спутниковую систему воздействуют помехи только от четырех наиболее близко расположенных систем (рис. 3). Также примем, что неточность удержания искусственного спутника Земли (ИСЗ) на позиции и ориентации антенн ЗС пренебрежимо малы. Тогда

$$\frac{I}{C} = 2\frac{I(\theta)}{C} + 2\frac{I(2\theta)}{C}.$$

При сближении соседних спутников (уменьшении угла разноса θ) растут взаимные помехи (падает *C/I*), вследствие

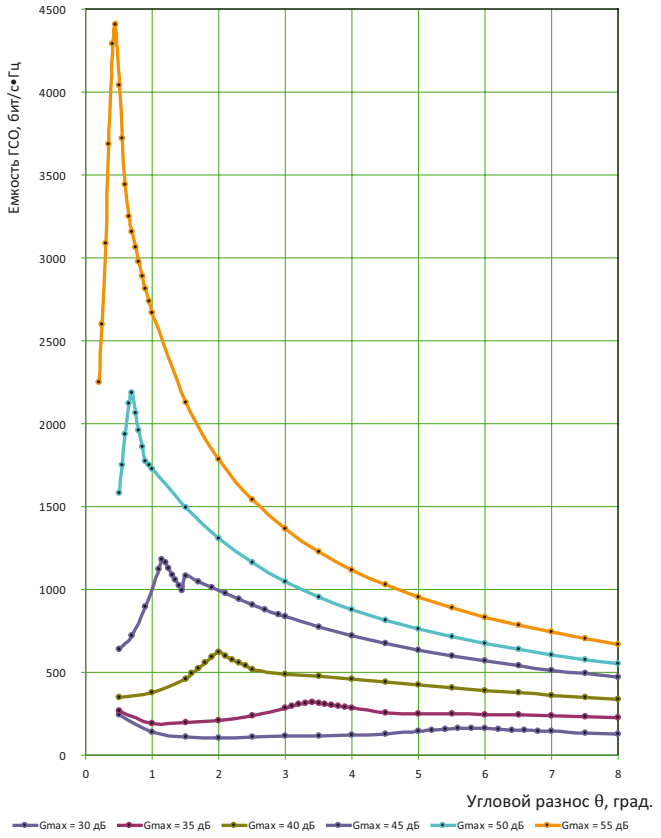

Рис. 4

чего снижается пропускная способность каждой системы, зато увеличивается число систем $k = 360/\theta$.

На рис. 4 показана полученная при этих условиях зависимость предельной суммарной пропускной способности ГСО от углового разноса соседних спутников при различном усилении антенн ЗС как параметра. Из рисунка видно, что существует некоторый оптимальный угловой разнос, зависящий от усиления антенны ЗС, при котором емкость ГСО максимальна.

В табл. 4 приведены соответствующие рис. 4 значения оптимального углового разноса соседних спутников и потенциально достижимая емкость ГСО.

Таблица 4

Емкость ГСО, бит/с·Гц/град.	G_{max}, дБ	θ_{opt}, град.	$(C/I)_{opt}$, дБ	Емкость ГСО, бит/с·Гц
0,46	30,0	5,8	7,2	164,4
0,89	35,0	3,4	8,6	321,2
1,72	40,0	2,0	10,0	622,0
3,27	45,0	1,15	11,0	1178,0
6,07	50,0	0,7	12,6	2185,9
12,24	55,0	0,45	16,5	4408,6

Из-за принятых упрощающих предположений полученные значения емкости ГСО, естественно, не могут претендовать на точность, однако данные зависимости позволяют выявить, что при определенном $\theta = \theta_{opt}$ (разном для разных антенн ЗС) пропускная способность спутниковых систем достигает максимума. Значения θ_{opt} и $(C/I)_{opt}$, приведенные в табл. 4, могут служить ориентиром для дальнейшей работы МСЭ в направлении пересмотра действующих критериев по *C/I*, рекомендуемым параметрам антенн ЗС и угловому разносу спутников.

Отметим, что оценка потенциальной пропускной способности, указанная в табл. 4, может быть удвоена при двойной поляризации, а также умножена на число повторов той же полосы в системах с узкими лучами и многократным использованием полосы частот. Так, например, у некоторых современных ИСЗ число лучей достигает 500 [10] и при гексагональной сетке с четырьмя различными полосами частот число повторов может составить 125, что означает соответствующее увеличение пропускной способности ГСО. Это подтверждается данными документа МСЭ [11], который на основе примеров реалистичных многолучевых систем дает значения ε до 90 бит/с·Гц·град. К сожалению, многолучевая структура зоны обслуживания не имеет преимуществ в случае систем вещания.

Из вышеизложенного можно сделать общий вывод: международному сообществу спутниковых операторов придется согласиться с принятием ряда существенных ограничений на параметры систем спутниковой связи, чтобы разрешить создавшуюся неприемлемую ситуацию, при которой реализация новых систем практически невозможна.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кантор Л. Я., Тимофеев В. В.** Спутники связи и проблема геостационарной орбиты. — М.: Радио и связь, 1988.
2. **Кантор Л. Я.** Расцвет и кризис спутниковой связи//Электросвязь. — 2007. — № 7.
3. Workshop of efficient use of the spectrum/orbit resource: Collection Reports. — Geneva. — 2009. — May 6.
4. Регламент радиосвязи. — МСЭ, 2008.
5. Рек. МСЭ-Р S.580—6. Диаграммы направленности для использования в качестве норм проектирования антенн земных станций, работающих с геостационарными спутниками.
6. Рек. МСЭ-Р S.465—5. Эталонная диаграмма направленности антенны земной станции для координации и оценки помехи в диапазоне частот от 2 ГГц до примерно 30 ГГц.
7. Приложение 8 к Регламенту радиосвязи. Метод определения необходимости координации между геостационарными спутниковыми сетями, совместно использующими одни и те же полосы частот.
8. Рек. МСЭ-Р P.618—9. Данные о распространении радиоволн и методы прогнозирования, необходимые для проектирования систем связи на линии Земля–космос.
9. Рек. МСЭ-Р P.676—6. Затухание в атмосферных газах.
10. Terrestar-1 arrives in Kourou/Satellite Today. — 2009. — May 19.
11. Рек. МСЭ-Р S.1782.

Получено 17.06.2009