

УДК 621.396.946(083)

## АНАЛИЗ СОВМЕСТИМОСТИ СИСТЕМ СПУТНИКОВОГО ВЕЩАНИЯ С НАЗЕМНЫМИ СТАНЦИЯМИ РАДИОСВЯЗИ

Л.Я. Кантор, главный научный сотрудник ФГУП НИИР, д.т.н.; levkantor@rambler.ru  
В.Г. Береговский, ФГУП НИИР

**Ключевые слова:** спутниковое вещание, наземные станции радиосвязи, геостационарная орбита, Ка-диапазон, долговременная помеха, кратковременная помеха, критерий допустимой помехи.

В повестку дня предстоящей Всемирной конференции по радиосвязи 2012 г. (ВКР-12) включен вопрос о принципах распределения орбитально-частотного ресурса в полосе частот 21,4–22 ГГц, выделенного для систем спутникового вещания. При подготовке в рамках Международного союза электросвязи (МСЭ) проектов решений этой проблемы возникли глубокие противоречия между странами, планирующими развитие таких систем, и странами, заинтересованными в сохранении и развитии наземных линий радиосвязи. Проведенное в НИИР исследование указывает возможный путь решения этой проблемы без серьезного ущерба для обеих сторон.

Геостационарная орбита (ГСО) — уникальный, но ограниченный ресурс для спутниковых систем радиосвязи. Перегруженность ее спутниковыми системами связи и вещания (СССВ), работающими в диапазонах С (6/4 ГГц) и Ku (14/11–12 ГГц), является основным фактором, сдерживающим развитие таких систем [1]. Для решения этой проблемы Регламент радиосвязи МСЭ [2] выделил для СССР широкие полосы частот в диапазоне Ка (30/20 ГГц). Большое затухание сигнала в осадках, возникающее в этом диапазоне, сегодня не является непреодолимым препятствием для реализации систем спутникового вещания, подтверждением чему служит появление на орбите многих спутников, работающих в Ка-диапазоне.

Для спутникового вещания (по терминологии [2] — радиовещательной спутниковой службы (РвСС)) в диапазоне Ка выделена полоса частот 21,4–22 ГГц. Однако число поданных в МСЭ заявок на системы РвСС (приближающееся к 1000) явно превосходит реальные возможности размещения систем на ГСО без взаимных помех.

Усугубляет проблему то, что эта же полоса частот выделена Регламентом радиосвязи на первичной основе и наземной фиксированной службе (ФС). Во многих странах, включая Россию, в полосе 21,4–22,0 ГГц уже работает большое количество наземных станций (НС) фиксированной службы. Резолюцией 525 МСЭ-Р определено: «...все службы, отличные от радиовещательной спутниковой службы... в полосе 21,4–22,0 ГГц в Районах 1 и 3... могут работать при условии, что они не создают вредных помех системам РвСС... и не требуют защиты от этих систем». Сохранение Резолюции 525 в таком виде делает развитие наземных систем ФС практически бесперспективным.

В настоящей статье приведены результаты анализа помех, позволяющие оценить усредненную вероятность причинения помехи, превышающей допустимый критерий, станциям ФС, расположенным в любой точке земной поверхности, и определить условия, при которых совмещение систем спутникового вещания и наземных систем ФС станет возможным.

**Оценка вероятности причинения вредной долговременной**

**помехи НС ФС от спутников РвСС.** Исходным положением для проведения анализа послужило утверждение, что ось луча антенны НС ФС, расположенной в любой точке поверхности Земли (между 81° с.ш. и 81° ю.ш.) и имеющей угол возвышения не более предельного  $e_m$ , при двух значениях азимута обязательно пересечет геостационарную орбиту. Угол  $e_m$  определялся по формуле

$$e_m = \arccos \left( \frac{R \sin \varphi}{\sqrt{R^2 + r^2 - 2Rr \cos \varphi}} \right),$$

где  $R=42164,17$  км — радиус геостационарной орбиты;  $r=6378,136$  км — радиус Земли;  $\varphi$  — широта точки размещения НС ФС на поверхности Земли.

В этом случае могут образоваться две области ( $\delta$ ) значений азимута  $A$ , в пределах которых может быть нарушен критерий допустимой долговременной помехи  $I/N=-10$  дБ (при отсутствии других указаний использован критерий, установленный в [3] для полосы частот 17,7–19,3 ГГц), создаваемой наземной станцией ФС спутниками РвСС ( $I/N$  — отношение мощности помехи к мощности теплового шума на входе приемника).

Приняв, что во множестве станций ФС, расположенных на поверхности Земли, все значения азимута луча антенны равновероятны в пределах  $0...360^\circ$ , определим вероятность нарушения указанного выше критерия величиной

$$P(\%) = \left( \frac{2\delta}{360} \right) \times 100. \quad (1)$$

Вероятность нарушения критерия допустимой помехи для некоторой станции фиксированной службы, расположенной на широте  $\varphi$ , будет точно такой же для любой станции с теми же параметрами, находящейся на той же широте и имеющей то же угловое отклонение  $\alpha$  точки пересечения оси луча антенны с ГСО относительно точки размещения ближайшего геостационарного спутника РвСС, расположенного восточнее (рис. 1). Усреднение по широте НС ФС  $\varphi$ , углу возвышения антенны НС  $e$  и угловому отклонению  $\alpha$  позволяет получить среднее значение вероятности превышения критерия допустимой помехи на всей территории Земли в выбранных пределах широты (для определенных параметров НС).

На рис. 1 использованы следующие обозначения:  $e$  — угол места антенны НС ФС;  $\Delta A$  — изменение азимута при повороте антенны НС от точного наведения на ГСО;  $\varphi$  — широта, на которой располагается НС;  $\gamma$  — угловой разнос между спутниками на ГСО;  $\varepsilon$  — минимальный угловой разнос между лучом антенны НС ФС, отведенным от направления точного наведения на ГСО на  $\Delta A$ , и лучом, направленным на ГСО.

Расчеты  $P(\%)$  выполнялись на средней частоте полосы, равной 21,7 ГГц. Плотность потока мощности, создаваемая каждым спутником РвСС в условиях свободного пространства, составляет:  $-115$  дБВт/м<sup>2</sup>/МГц для углов  $e \leq 5^\circ$ ;  $-105$  дБВт/м<sup>2</sup>/МГц для углов  $e \geq 25^\circ$  и  $-115 + 0,5(e-5)$  дБВт/

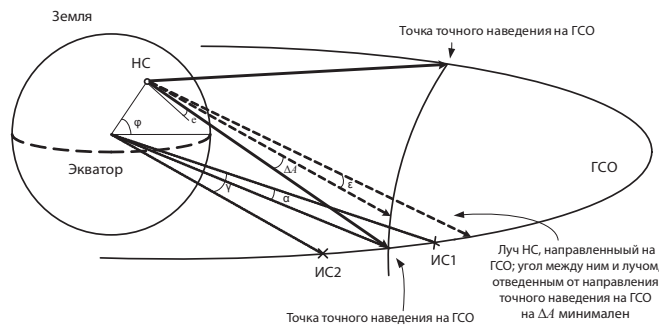


Рис. 1

м<sup>2</sup>/МГц для углов 5° < ε < 25°.

Параметры НС ФС приняты в соответствии с [4]:

- мощность теплового шума N = -135 дБВт/МГц (учитывалось также более реальное значение — -142 дБВт/МГц);
- максимальное усиление антенны НС ФС 39 дБ; 42 дБ; 46 дБ;
- диаграмма направленности антенны НС ФС описывается соотношениями, приведенными в [5].

НС ФС располагается в любой точке поверхности Земли с равной вероятностью в пределах 66° ю.ш. ... 66° с.ш.

В соответствии с данными циркуляра МСЭ-Р BR 1FIC 2654 наземные станции ФС с углом возвышения антенны, равным:

- -2° — учитывались как станции с весовым коэффициентом 0,6%;
- от -1 до +1° — как станции с углом возвышения 0° и весовым коэффициентом 96,1%;
- 2° — как станции с весовым коэффициентом 1,7%;
- 3° — как станции с весовым коэффициентом 0,7%;
- от 4 до 6° — как станции с углом возвышения 5° и весовым коэффициентом 0,4%;
- от 7 до 9° — как станции с углом возвышения 8° и весовым коэффициентом 0,3%;
- от 10 до 16° — как станции с углом возвышения 12° и весовым коэффициентом 0,2%.

Учитывалась суммарная помеха от спутников РвСС, расположенных на геостационарной орбите равномерно с угловым разносом γ = 4° или γ = 10°.

Положение спутников на орбите (относительно точки точного пересечения луча антенны НС с ГСО) изменялось на угол от 0 до 4° (10°); все эти положения считались равновероятными. Учитывалась суммарная помеха от четырех ближайших спутников.

Важно отметить, что отклонение луча антенны НС ФС от точного наведения на ГСО по азимуту Δ и минимальный угловой разнос этого луча от ГСО ε связаны нелинейной и несимметричной (относительно A<sub>0</sub>) зависимостью ε = χ<sup>-1</sup>(Δ, φ) от широты φ расположения НС ФС. Для уточнения аналогичных данных, содержащихся в [6], эта зависимость была рассчитана заново.

Расчет минимального затухания мешающего сигнала от спутника РвСС в газах атмосферы выполнен при параметрах атмосферы, определенных в [7].

Ослабление помехи вследствие эффекта рассеяния луча (beam spreading) не принималось во внимание, так как этот эффект обусловлен рефракцией (изгибанием) луча в атмосфере и при оценке усредненной вероятности помехи от спутников, располагающихся в любой точке ГСО с одинаковой вероятностью, искривление лучей, вызванное рефракцией, не приведет к заметным изменениям величины помехи.

Расчет вероятности превышения критерия допустимой

Таблица 1

Разнос спутников	Состояние	Коэффициент усиления, %			
		32 дБ	39 дБ	42 дБ	46 дБ
N = -142 дБВт/МГц (долговременная помеха)					
4°	Без начального отвода	2,63	2,16	1,98	1,75
	С отводом 1,5°	1,00	0,71	0,59	0,43
10°	Без начального отвода	1,4	1,06	0,94	0,79
	С отводом 1,5°	0,45	0,29	0,23	0,17
N = -135 дБВт/МГц (долговременная помеха)					
4°	Без начального отвода	1,06	0,78	0,7	0,6
	С отводом 1,5°	0,1	0,06	0,05	0,04
10°	Без начального отвода	0,42	0,3	0,27	0,23
	С отводом 1,5°	0,046	0,023	0,017	0,011

помехи выполнен в двух вариантах: а) без предположения об обязательном отводе лучей антенн НС ФС от точного наведения на ГСО; б) в предположении, что лучи антенн НС ФС должны быть отведены от точного направления на ГСО не менее чем на 1,5° (по аналогии с табл. 21-1 Статьи 21 Регламента радиосвязи МСЭ [2]) и все остальные значения азимут А принимает с равной вероятностью, за исключением двух запрещенных участков шириной χ(ε, φ), где ε = ±1,5°. Во втором случае вместо (1) используется выражение

$$P(\%) = \left( \frac{(\delta_+ - \chi(\epsilon_+, \varphi)) + (\delta_- - \chi(\epsilon_-, \varphi))}{360 - 2\chi(\epsilon, \varphi)} \right) \times 100, \quad (2)$$

где δ<sub>+</sub> и δ<sub>-</sub> определяются как угловое отклонение луча антенны НС по азимуту от точки точного наведения на ГСО, необходимое для обеспечения указанного выше критерия защиты, а индексы «+» и «-» соответствуют восточному и западному отклонению луча от точного наведения на ГСО (ε<sub>+</sub> = 1,5°, ε<sub>-</sub> = -1,5°). Результаты расчета вероятности превышения критерия долговременной помехи приведены в табл. 1.

На рис. 2 показана зависимость отношения I/N от отклонения луча антенны НС ФС Δ при различных параметрах наземной станции и различном ее положении на земном шаре. Заштрихована зона обязательного отвода луча антенны НС ФС при ε = ±1,5°.

**Оценка вероятности причинения вредной кратковременной помехи НС ФС от спутников РвСС.** При рассмотрении долговременной помехи не учитывался эффект мерцаний и многолучевости (scintillation and multipath fading), способный привести к кратковременному возрастанию уровня мешающего сигнала.

Расчет эффекта мерцаний и многолучевости был выполнен в соответствии с [8] и [9]. Для определения доли станций, где превышен критерий помехи, применялась изложенная выше методика расчета.

В качестве критерия допустимой помехи, при отсутствии других указаний, были взяты критерии, установленные [3], а именно I/N ≤ 14 дБ для более чем 0,01% времени и I/N ≤ 18 дБ для более чем 0,0003% времени.

Корреляция между затуханием в газах (минимальная величина которого использовалась здесь в соответствии с [7]) и возрастанием мешающего сигнала из-за эффекта мерцаний/многолучевости не учитывалась, поэтому полученный результат следует считать оценкой сверху (для наилучшего случая). Полученные результаты приведены в табл. 2.

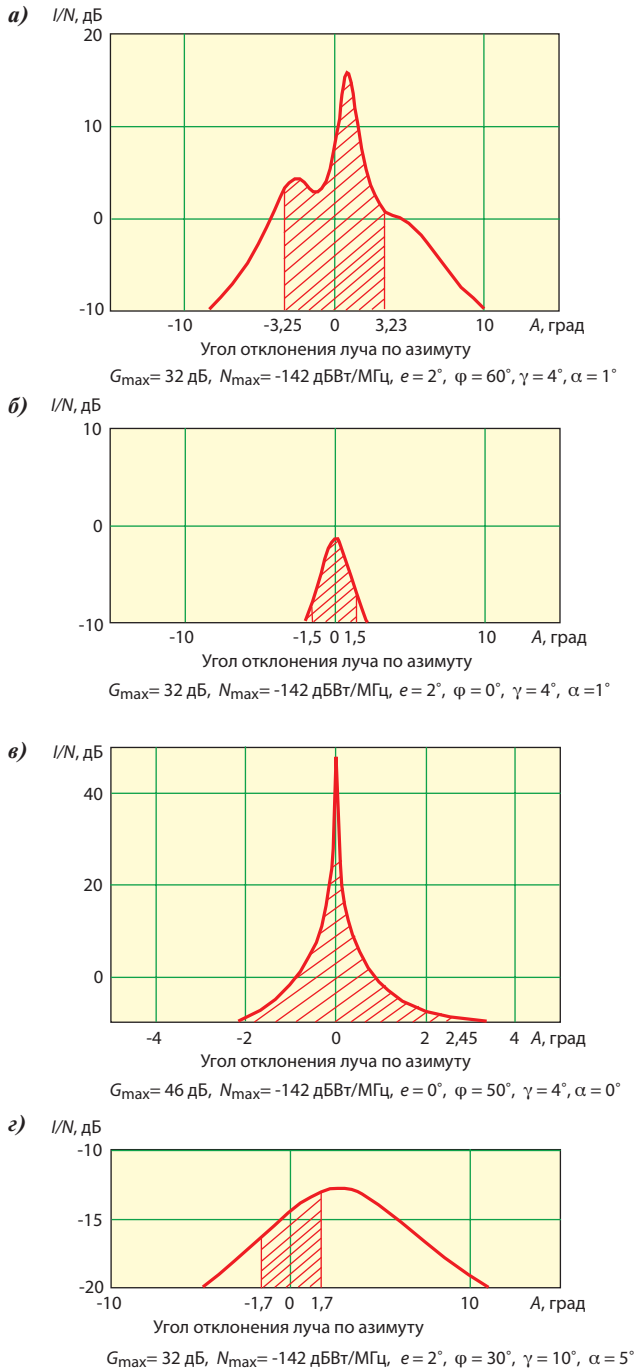


Рис. 2

Из этих таблиц следует, что доля станций ФС, которые могут получить превышение критерия кратковременной помехи из-за эффекта мерцаний/многолучевости, существенно меньше, чем доля станций, где может возникнуть помеха, превышающая долговременный критерий.

Важно отметить, что все станции, включенные в табл. 2, — это часть станций, указанных в табл. 1. Таким образом, поскольку возрастание помехи из-за эффекта мерцаний/многолучевости меньше разницы между долговременным и кратковременным критериями, на станциях, не испытывающих долговременной помехи, возникновение кратковременной помехи, превышающей критерий, невозможно.

**Выводы.** Результаты проведенного исследования показали, что при ограничении плотности потока мощности от систем спутникового вещания маской -105/-115 доля на-

Таблица 2

Разнос спутников	Состояние	Коэффициент усиления, %			
		32 дБ	39 дБ	42 дБ	46 дБ
$N = -142 \text{ дБВт/МГц}$ (кратковременная помеха)					
4°	Без начального отвода	1,5	1,16	1,02	0,85
	С отводом 1,5°	0,26	0,11	0,08	0,05
10°	Без начального отвода	0,62	0,44	0,38	0,32
	С отводом 1,5°	0,08	0,03	0,02	0,014
$N = -135 \text{ дБВт/МГц}$ (кратковременная помеха)					
4°	Без начального отвода	0,49	0,35	0,3	0,25
	С отводом 1,5°	0,013	$3 \cdot 10^{-3}$	$1,3 \cdot 10^{-3}$	$2,8 \cdot 10^{-4}$
10°	Без начального отвода	0,18	0,14	0,12	0,1
	С отводом 1,5°	$2,3 \cdot 10^{-3}$	$4,7 \cdot 10^{-4}$	$1,7 \cdot 10^{-4}$	$1,9 \cdot 10^{-5}$

земных станций, которые могут получить неприемлемую помеху, весьма мала, т.е. защита станций будет практически обеспечена. Весьма желательно при этом принять на ВКР-12 Рекомендацию по обязательному отводу антенн вновь строящихся наземных станций фиксированной службы от направления на ГСО на угол порядка 1,5°, как это установлено Статьей 21 [2] для соседних полос частот. При этом маска -105/-115, как следует из ряда документов МСЭ и как показал конкретный анализ для условий различных районов России, позволяет обеспечить необходимую готовность каналов систем РвСС.

Результаты анализа представлены в качестве вкладов Администрации связи России в МСЭ, одобрены собранием Рабочей группы 4А МСЭ и приведены в проекте отчета подготовительного собрания к конференции по пункту 1.13 повестки дня. Мы считаем, что использование этих результатов позволит разрешить существующий сегодня в полосе частот 21,4–22 ГГц конфликт между спутниковыми системами непосредственного вещания и наземными линиями радиосвязи без серьезного ущерба для обеих сторон.

ЛИТЕРАТУРА

1. Кантор Л.Я. Новый эволюционный подход к международному распределению орбитально-частотного ресурса // Электросвязь. — 2008. — № 12.
2. Регламент радиосвязи // МСЭ (ITU). — 2008.
3. Recommendation ITU-R F.1495. Interference criteria to protect the fixed service from time varying aggregate interference from other radiocommunication services sharing the 17.7-19.3 GHz band on a co-primary basis.
4. Recommendation ITU-R F.758-4. Considerations in the development of criteria for sharing between the terrestrial fixed service and other services.
5. Recommendation ITU-R F.1245-1. Mathematical model of average radiation patterns for line-of-sight point-to-point radio-relay system antennas for use in certain coordination studies and interference assessment in the frequency range from 1 GHz to about 70 GHz.
6. Recommendation ITU-R SF.765. Intersection of radio-relay antenna beams with orbits used by space stations in the fixed-satellite service.
7. Recommendation ITU-R F.1404-1. Minimum propagation attenuation due to atmospheric gases for use in frequency sharing studies between systems in the fixed service and systems in the broadcasting-satellite, mobile-satellite and space science services.
8. Recommendation ITU-R P.618. Propagation data and prediction methods required for the design of Earth-space telecommunication systems.
9. Recommendation ITU-R P.530. Propagation data and prediction

- methods required for the design of terrestrial line-of-sight systems.
10. Электромагнитная совместимость систем спутниковой связи / Под ред. Л.Я. Кантора и В.В. Ноздрина. — М.: НИИР, 2009. — 280 с.
  11. Document ITU-R WP 4A/317. Estimation of probability of causing harmful interference to FS terrestrial stations from geostationary BSS satellites in the frequency band 21.4-22.0 GHz.
  12. Document ITU-R WP 4A/391. Addition to estimation of probability of causing harmful interference to FS terrestrial stations from geostationary BSS satellites in the frequency band 21.4—22.0 GHz.
  13. Document ITU-R CPM 11-02/1. Draft CPM report.

*Получено 05.10.10*

