

УДК 621.391

Широтные особенности электромагнитной совместимости в региональных сетях спутниковой связи

А. С. Курманов, А. С. Мазманишвили

Харківський державний політехнічний університет

Надійшла до редакції 19.04.99

Розглянута задача розрахунку та візуалізації ймовірності похибки $P_{\text{ем}}$ при передаванні цифрової інформації в системі зв'язку із супутниками-передавачами на геостационарній орбіті. На основі побудованого алгоритму оцінки ймовірності похибки при передаванні цифрової інформації в системах супутникового зв'язку із фазовою маніпуляцією розроблено програмний засіб розрахунку та візуалізації регіональних карт ймовірності похибок. Наведено приклади розрахунку спрощеної системи супутникового зв'язку для обраних екваторіальних та середньширотних регіонів, вивчено вплив широти на сумісність системи зв'язку.

ВВЕДЕНИЕ

В настоящее время успешное решение задач приема/передачи цифровой информации в глобальном масштабе предполагает использование спутниковых систем связи на геостационарной орбите (ГО), применяющих фазовую манипуляцию. В свою очередь, развитие радиоэлектронных средств, в том числе глобального назначения, невозможно без всестороннего анализа [5, 6] электромагнитной совместимости (ЭМС) рассматриваемых систем [1, 2]. При эксплуатации односпутниковой системы связи величина вероятности ошибки, допустимой на один символ, обеспечивается выбором соответствующей величины отношения сигнал/шум. В случае, когда число спутников на геостационарной орбите более одного, вследствие наложения геометрических зон передачи излучение соседних спутников становится помехой для устойчивого приема от выбранного спутника. Среди большого числа параметров, требующих оптимизации, назовем географические (выбираемый регион и его широта, точки нацеливания, точки размещения на ГО и угловой интер-

вал между ними), электродинамические (мощность источников и ретрансляторов, углы раскрытия индикатрис передающих и приемных антенн, рабочие частоты). В качестве критериев, пригодных для использования при синтезе систем спутниковой системы связи (ССС), возможно выбрать такие, как площадь уверенного приема (гарантирующего непревышение заданной вероятности ошибки $P_{\text{ем}}$ на один передаваемый символ), площадь уверенного приема, вычисленная с учетом пространственного распределения плотности населения, «штрафной» критерий за электромагнитное освещение неразрешенных регионов и др. Большое количество рассматриваемых ситуаций и допустимых критериев делает невозможным структурную систематизацию и синтез СССР на основе формальной оптимизации. Однако вполне возможно рассмотрение типичных ситуаций, анализ которых позволяет извлечь информацию, пригодную при синтезе СССР.

В настоящей работе рассмотрена эффективность СССР от количества работающих на одной и той же частоте спутников-компонентов, из которых конфигурируется СССР. В ней проанализированы ши-

ротные зависимости для различных величин углового раскрытия индикатрис передающих и приемных антенн. Анализ проведен на примерах простых ССС, образованных из двух, трех и четырех спутниковых систем. На этих примерах возможно изучить электромагнитную совместимость и взаимовлияние средств связи в выбранном регионе.

Таким образом, целью работы является выявление основных широтных динамических закономерностей электромагнитной совместимости и их демонстрация на примере типичных широтных конфигураций ССС.

Развитый в настоящей работе подход изучения электромагнитной совместимости можно применять не только к системам спутниковой связи с фазовой манипуляцией, но и к другим ее видам (амплитудная, частотная) и к другим родам связи, например системам телефонной, радиорелейной или телевизионной коммуникации.

МЕТОД РАСЧЕТА

Пусть на ГО находится заданная ССС с конфигурацией C из K передающих спутников с фиксированными индикатрисами и абсолютными координатами по долготе θ , угловой интервал между которыми на ГО составляет $\Delta\theta$ градусов. При расчете величина $P_{ем}$ находилась на основе метода статистического моделирования путем вычисления оценки $P_{ем}$ относительно реализаций заданного выборочного объема N [3, 4]. В рамках выбранного метода производится, по существу, моделирование статистической обстановки. Объем выборки для любых координат x , y и любого значения $P_{ем}$ подбирался таким образом, чтобы относительная погрешность оценки $\alpha = |P_{ем} - P_{ем}|/P_{ем}$ не превосходила заданной величины α_0 , которая в этой работе составляет 5 %. При анализе рассмотрено случайное событие, заключающееся в том, что относительная погрешность оценки $P_{ем}$ величины $P_{ем}$ не превышает α , т. е.

$$\text{Prob}\{\alpha P_{ем} \mathbf{D}_N [\hat{P}_{ем}]^{-1/2} \leq \gamma\} = q, \quad (1)$$

где $\gamma = \Phi^{-1}(q)$; $\Phi(q)$ — функция Лапласа.

Статистический анализ приводит к следующей зависимости требуемого объема выборки N от физических параметров задачи:

$$N \approx 2\rho^2 \Omega_C [\sin(\pi/M) + \Omega_C](\gamma/\alpha)^2. \quad (2)$$

Здесь ρ^2 — отношение сигнал/шум по мощности, M — индекс фазовой манипуляции (мы используем $M = 4$), $\Omega_C = \sum_j R_j$ — сумма всех «помеховых»

вкладов R_j от компонентов рассматриваемой ССС на приемник, действующий в точке с координатами x , y .

Поскольку для любой действующей конфигурации ССС должно быть обеспечено неравенство $\sin(\pi/M) > \Omega_C$, то выделим теперь области с заданной вероятностью $P_{ем}$, для которых справедливо

$$\ln(\rho P_{ем}) \approx -\rho^2 [\sin(\pi/M) + \Omega_C]^2, \quad (3)$$

что и приводит к интересующей нас зависимости для объема выборки:

$$N \approx 2\rho \Omega_C \sqrt{-\ln(\rho P_{ем})(\gamma/\alpha)^2}. \quad (4)$$

Выражения (2) или (4) дают для величины N значение, которое обеспечит при расчете вероятности ошибки $P_{ем}$ получение ее оценки $P_{ем}$, неотклоняющейся с вероятностью q от истинного значения с относительной погрешностью α .

На базе статистического алгоритма расчета вероятности ошибки и распространения его на набор пространственных узлов были разработаны числовой алгоритм и программное обеспечение для расчета и визуализации информационных карт (ИК) вероятности ошибок для выбранной конфигурации ССС в заданном регионе (Украина, Россия, Западная Европа и др.).

Вычисления выполнены на основе специально созданного программного средства в среде языка C++. Время расчета на каждую из нижеприведенных ИК составило около 15 мин.

ИНФОРМАЦИОННЫЕ КАРТЫ

Изучение влияния рассматриваемых параметров на характеристики ССС удобно выполнять с помощью информационных карт [3, 4]. Расчетные документы подобного типа представляют в удобном виде вероятностную информацию, отнесенную к выделенному региону. Расчеты выполнялись в двух вариантах: для случая региона, расположенного на экваторе, и региона на широте 50° . Представляемые ниже ИК сгруппированы по числу спутников—ретрансляторов (ИСЗ) в ССС и по их взаимному расположению.

На рис. 1 представлены две информационных карты, описывающие зоны взаимовлияния двух ИСЗ. Сопоставление пунктирно указанных зон уверенного приема, соответствующих случаю работы ИСЗ по одному, с их аналогами, соответствующими совместной их работе, указывает на значительную роль взаимовлияния. Изменение зон уверенного приема проявляется тем сильнее, чем

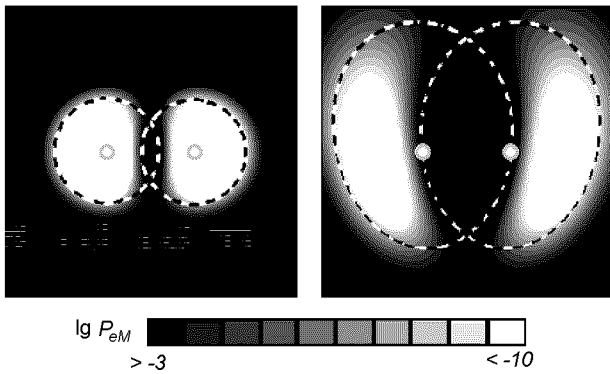


Рис. 1. Набор из двух информационных карт для 2-спутниковой конфигурации (места нацеливания антенн ИСЗ указаны кружками); слева — широта 0°; справа — широта 50°; пунктиром указаны зоны уверенного приема ($P_{em} \leq 10^{-8}$) у каждого ИСЗ по отдельности без взаимовлияния

больше широта точек нацеливания антенн ИСЗ. Можно получить выражение, описывающее долю η площади, ответственной за взаимовлияние, отнесенную ко всей площади электромагнитного освещения. Для случая двух ИСЗ, облучающих две окружности радиусом R , найдем

$$\eta = \frac{2}{\pi} \arctg \frac{\sqrt{R^2 - L^2}}{L} - \frac{L\sqrt{R^2 - L^2}}{2\pi R^2}, \quad (5)$$

где $2L$ — расстояние между центрами освещаемых кругов (точек нацеливания). С увеличением R , что характерно при увеличении широты или при увеличении углового раскрытия индикатрисы антенн ИСЗ, площадь взаимовлияния может покрыть всю зону облучения. На рис. 1 пунктирные линии проведены по уровню $P_{em} \approx 10^{-8}$.

Характеристики ССС для 2-спутникового региона (рис. 1):

Географические координаты региона:
 $(-10^\circ, 10^\circ) \times (-10^\circ, 10^\circ)$.

Положение спутников на ГО:
 ИСЗ-1 $\theta = -1.5^\circ$, ИСЗ-2 $\theta = 1.5^\circ$.

Точки нацеливания (слева, справа):
 ИСЗ-1 $(0^\circ, -3^\circ), (50^\circ, -3^\circ)$
 ИСЗ-2 $(0^\circ, 3^\circ), (50^\circ, 3^\circ)$

(здесь и ниже первая величина в скобках — широта, вторая — долгота).

Ширина диаграммы приемной антенны земных станций: $\gamma = 2^\circ$.

Ширина диаграммы спутниковых передающих антенн: $\gamma = 1^\circ$.

Широтная зависимость электромагнитной совместимости отчетливо видна из рис. 1. В результате триангуляционного увеличения проекции электро-

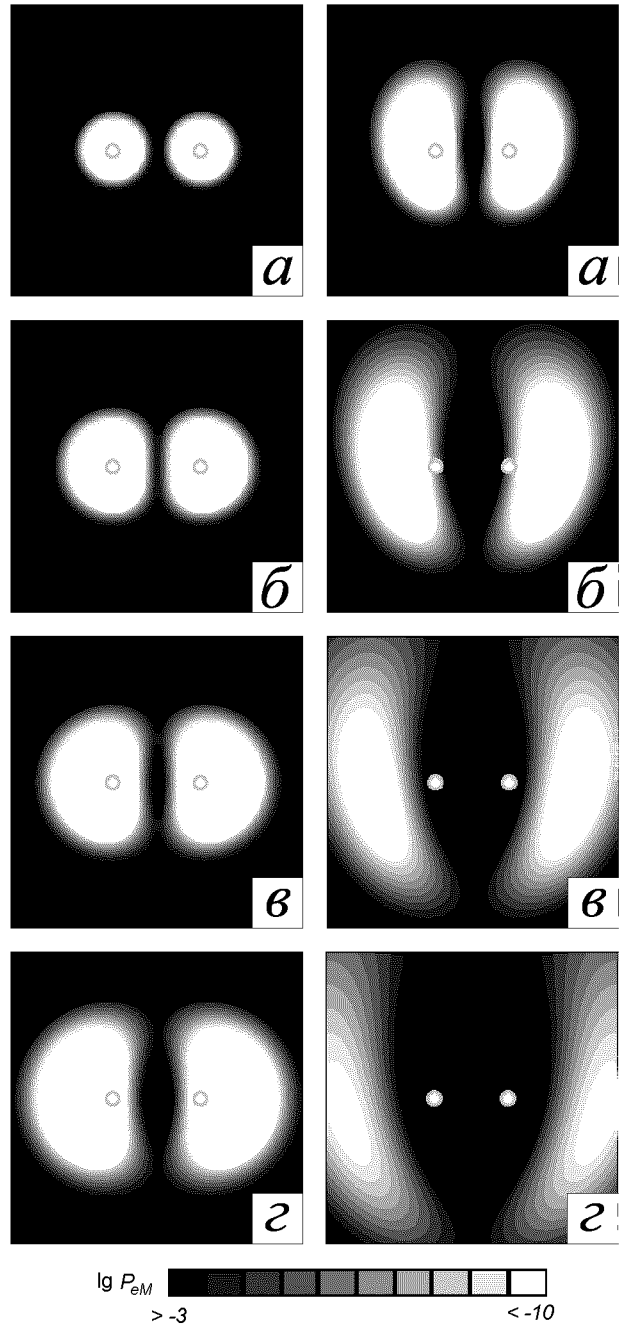


Рис. 2. Два набора из четырех информационных карт для 2-спутниковой конфигурации (места нацеливания антенн ИСЗ указаны кружками); слева — широта 0°; справа — 50°

магнитного освещения в более широтном регионе увеличился и размер области перекрытия от соседних спутников—ретрансляторов. Это привело к относительному уменьшению области уверенного приема ($P_{em} \leq 10^{-9}$). Видно, что хотя зона уверенного приема при отсутствии взаимных помех доста-

точно велика, ее реальные размеры оказываются заметно меньшими, если учитывать влияние соседних спутников, работающих на той же частоте. На последующих рисунках пунктирные линии, аналогичные линиям на рис. 1, не приведены из соображений наглядности.

ССС из 2 ИСЗ. На рис. 2 представлены два набора из четырех информационных карт для 2-спутниковой конфигурации (места нацеливания указаны кружками); первый из них (расположен слева) отвечает экваториальному региону, второй (расположен справа) соответствует широте 50°.

Характеристики 2-спутниковой ССС:

Географические координаты региона:
 $(-10^\circ, 10^\circ) \times (-10^\circ, 10^\circ)$.

Положение спутников на ГО:
 ИСЗ-1 $\theta = -1^\circ$, ИСЗ-2 $\theta = 1^\circ$.

Точки нацеливания (слева, справа):
 ИСЗ-1 $(0^\circ, -3^\circ), (50^\circ, -3^\circ)$;
 ИСЗ-2 $(0^\circ, 3^\circ), (50^\circ, 3^\circ)$.

Ширина диаграммы приемной антенны земных станций $\gamma = 1^\circ$.

Ширина диаграммы спутниковых передающих антенн изменяется следующим образом, при этом символы *a*, *b*, *v* и *z* указаны на рис. 2:

	ИСЗ-1	ИСЗ-2
<i>a</i>	0.6°	0.6°
<i>b</i>	0.9°	0.9°
<i>v</i>	1.2°	1.2°
<i>z</i>	1.5°	1.5°

На рис. 2 показана эволюция помеховой обстановки при изменении угла раскрыва индикатрис передающих антенн. Все остальные параметры конфигурации спутниковой связи остаются постоянными. В левом и правом столбцах рисунка приведены информационные карты, соответствующие тем же самым параметрам, за исключением того, что зона обслуживания смещена вверх на 50° по широте. При этом существенно изменяются как форма, так и размер зон уверенного приема.

Из рис. 2 видно, что увеличение раскрыва индикатрис передающих антенн не позволяет в полной мере разрешить проблему помехоустойчивости. Происходит это потому, что увеличение угла раскрыва индикатрисы приводит к увеличению зоны перекрытия взаимодействующих станций, что обуславливает ухудшение помеховой обстановки в регионе. Этот эффект особенно проявляется на высоких широтах.

ССС из 3 ИСЗ. На рис. 3 представлены два набора из четырех информационных карт для 3-спутниковой конфигурации (места нацеливания антенны ИСЗ указаны кружками); слева — широта 0°; справа — 50°.

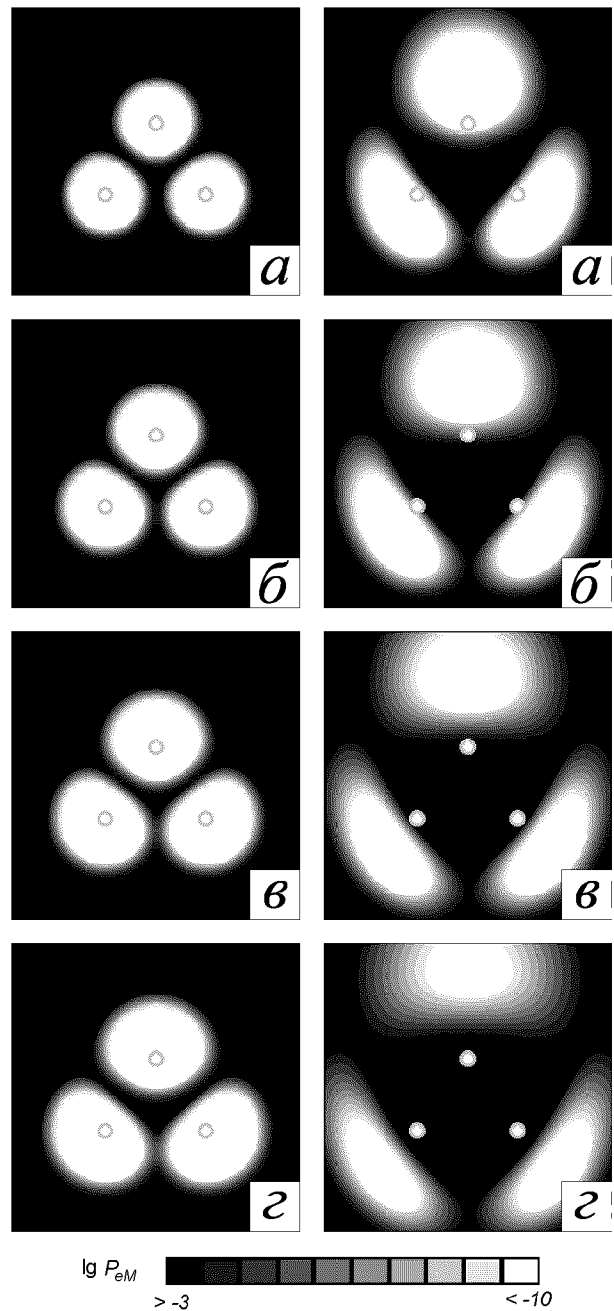


Рис. 3. Два набора из четырех информационных карт для 3-спутниковой конфигурации (места нацеливания антенны ИСЗ указаны кружками); слева — широта 0°; справа — 50°

спутниковой конфигурации (места нацеливания указаны кружками); первый из них (расположен слева) отвечает экваториальному региону, второй (расположен справа) соответствует широте 50°.

Характеристики 3-спутниковой ССС:

Географические координаты региона:
 $(-10^\circ, 10^\circ) \times (-10^\circ, 10^\circ)$.

Положение спутников на ГО:

ИСЗ-1 $\theta = -1.5^\circ$; ИСЗ-2 $\theta = 0^\circ$; ИСЗ-3 $\theta = 1^\circ$

Точки нацеливания (слева, справа):

ИСЗ-1 $(-3^\circ, -3.5^\circ)$, $(47^\circ, -3.5^\circ)$;

ИСЗ-2 $(2^\circ, 0^\circ)$, $(52^\circ, 0^\circ)$

ИСЗ-3 $(-2^\circ, 3.5^\circ)$, $(47^\circ, 3.5^\circ)$.

Ширина диаграммы приемной антенны земных станций:
 $\gamma = 1^\circ$ для крайних станций
и $\gamma = 0.6^\circ$ для средней.

Ширина диаграммы спутниковых передающих антенн (символы *a*, *b*, *v* и *z* указаны на рис. 3) изменяется следующим образом:

	ИСЗ-1	ИСЗ-2	ИСЗ-3
<i>a</i>	0.7°	0.7°	0.7°
<i>b</i>	0.8°	0.8°	0.8°
<i>v</i>	0.9°	0.9°	0.9°
<i>z</i>	1°	1°	1°

Динамика электромагнитного взаимодействия в экваториальном регионе, изображенная на рис. 3, практически во всех деталях идентична рис. 2, за исключением того, что средняя зона приема, соответствующая точке нацеливания $(2^\circ, 0^\circ)$, оказывается под сильным влиянием крайних спутников. Это влияние оказывается слабее, чем их собственное взаимовлияние. Для высоких широт, как и на рис. 2, помеховая обстановка еще более усложняется по сравнению с экваториальным регионом.

ССС из 4 ИСЗ. Уровень электромагнитной совместимости и качество передачи сигналов существенно связаны с относительной ориентацией спутников в ССС. В связи с этим в работе были рассмотрены различные конфигурации компонентов ССС на ГО.

На рис. 4 показаны схемы пространственной ориентации точек размещения и мест нацеливания для 4-спутниковой системы связи. Эти случаи отвечают различным взаимным расстояниям спутников на ГО.

На рис. 5 показаны отвечающие этим относительным ориентациям информационные карты, а

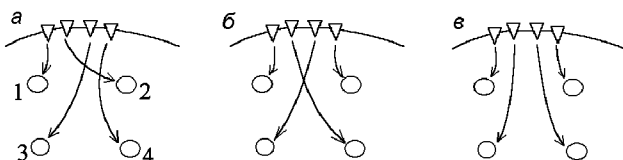
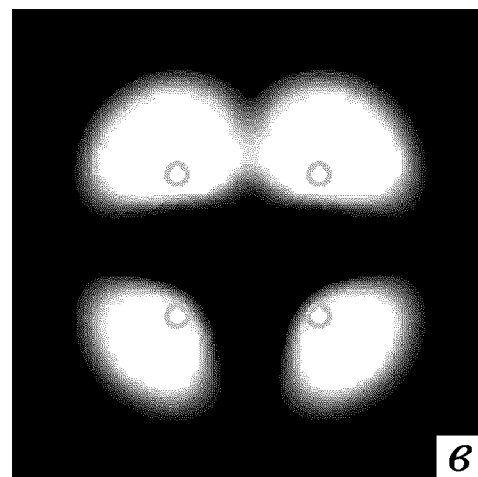
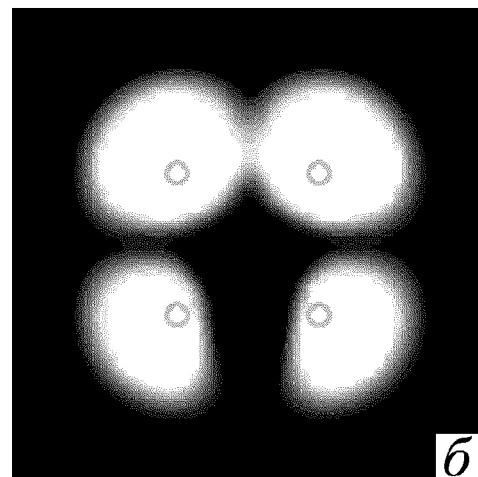
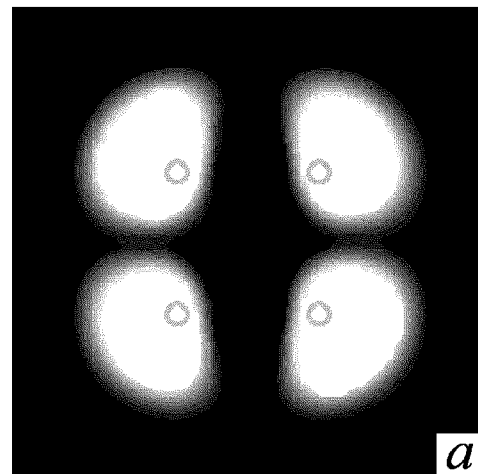


Рис. 4. Схематическое изображение 4-спутниковой конфигурации для рис. 5 и 6 (места нацеливания антенн ИСЗ указаны кружками)



$\lg P_{em}$ > -3 < -10

Рис. 5. Набор из трех информационных карт для 4-спутниковой конфигурации на широте 0° (места нацеливания антенн ИСЗ указаны кружками)

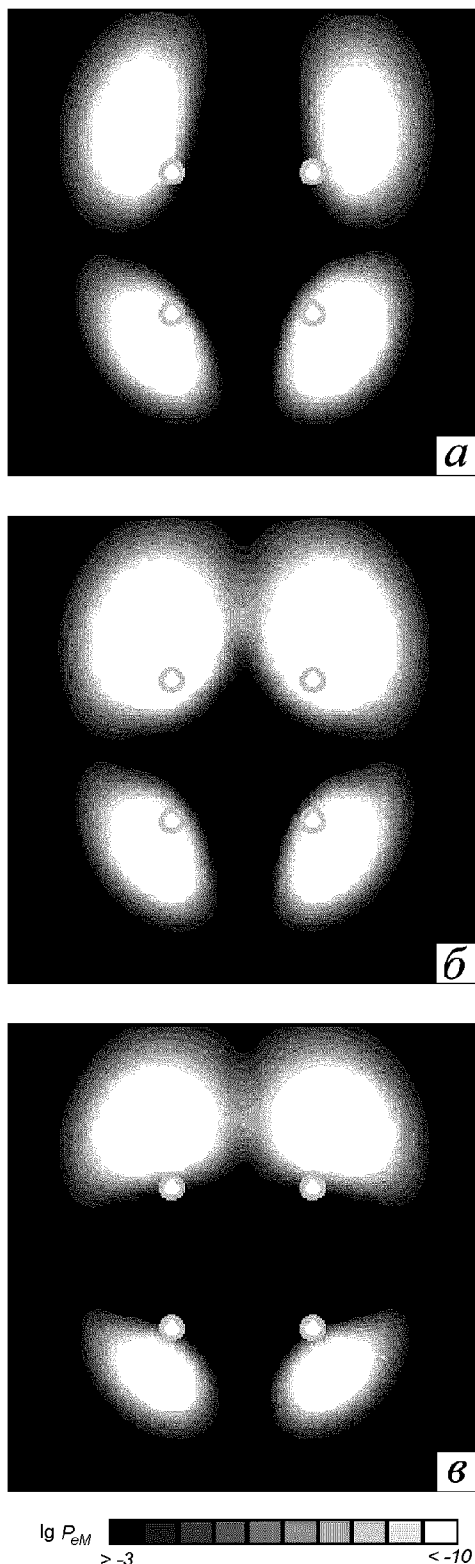


Рис. 6. Набор из трех информационных карт для 4-спутниковой конфигурации на широте 50° (места нацеливания антенн ИСЗ указаны кружками)

их более широтные аналоги изображены на рис. 6. При этом варианты ориентаций, как и на рис. 4, указаны буквами *a*, *b* и *v*.

Характеристики 4-спутниковой ССС:

Географические координаты региона:

$$(-10^\circ, 10^\circ) \times (-10^\circ, 10^\circ).$$

Положение спутников на ГО:

$$\text{ИСЗ-1 } \theta = -3^\circ, \quad \text{ИСЗ-2 } \theta = -1^\circ$$

$$\text{ИСЗ-3 } \theta = 1^\circ, \quad \text{ИСЗ-4 } \theta = 3^\circ.$$

Точки нацеливания (слева, справа):

$$\text{точка № 1} \quad (3^\circ, -3^\circ), \quad (47^\circ, -3^\circ);$$

$$\text{точка № 2} \quad (3^\circ, 3^\circ), \quad (47^\circ, 3^\circ);$$

$$\text{точка № 3} \quad (-3^\circ, -3^\circ), \quad (53^\circ, -3^\circ);$$

$$\text{точка № 4} \quad (-3^\circ, 3^\circ), \quad (53^\circ, 3^\circ).$$

Ширина диаграммы приемной антенны земных станций: $\gamma = 1.8^\circ$.

Ширина диаграммы антенн спутников-передатчиков:

$$\gamma = 1^\circ \quad \text{для экваториального региона};$$

$$\gamma = 0.6^\circ \quad \text{для широтного.}$$

Одним из основных параметров взаимодействия спутников при рассматриваемой их конфигурации, является угловое расстояние на орбите между спутниками, оказавшимися смежными в результате их комбинирования. Причем для высокоширотного региона в первую очередь необходимо обращать внимание на смежных соседей по долготе, так как с увеличением широты угловое рассогласование между спутниками на одной долготе убывает гораздо быстрее, чем между другими.

Из рис. 5 и 6 следует, что для рассмотренных вариантов наибольшей площадью зоны уверенного приема ($P_{\text{ем}} \leq 10^{-8}$) характеризуется вариант *b*, у которого спутники на ГО максимально разнесены.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Основное ограничение при использовании геостационарной орбиты — это взаимные помехи спутниковой связи.

В работе применены численные средства расчета и визуализации для анализа помеховой и электромагнитной обстановки в региональных системах спутниковой связи. При этом особое внимание уделено широтным зависимостям. Получены информационные карты, описывающие электромагнитную обстановку в системе спутниковой связи, используемой для передачи цифровых сообщений. Приведены результаты расчетов вероятности ошибки, возникающей в различных широтных регионах и в различных помеховых обстановках, показана существенная зависимость помехоустойчивости от широты. С дальнейшим увеличением

широты (вплоть до приполярных регионов) рассмотренные зоны устойчивого приема еще более видоизменяются.

Применение разработанного программного обеспечения обеспечивает получение информации о степени помехозащищенности передачи символов с помощью спутников на геостационарной орбите.

Полученные количественные характеристики вероятности ошибки позволяют оценить степень помехозащищенности системы при передаче и приеме сигналов потребителями в различных широтных регионах. На основе таких характеристик можно решать задачу синтеза оптимальной конфигурации системы спутниковой связи, что дает возможность рассмотрения проблемы эффективного использования геостационарной орбиты.

1. Калашников Н. И. Основы расчета электромагнитной совместимости систем связи через ИСЗ. — М.: Связь, 1970.— 160 с.
2. Кантор Л. Я., Тимофеев В. В. Спутниковая связь и проблема геостационарной орбиты. — М.: Радио и связь, 1988.— 168 с.
3. Мазманишвили А. С., Рафалович О. Я. Оценка вероятности ошибок взаимовлияния при передаче дискретной информа-

ции в системах спутниковой связи // Электронное моделирование.—1995.—17, № 4.—С. 94—95.

4. Мазманишвили А. С., Рафалович О. Я. Численные модели помехоустойчивости для украинских региональных сетей спутниковой связи // Космічна наука і технологія.— 1998.—4, № 1.—С. 92—101.
5. Петровский В. И., Седелников Ю. Е. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств. — М.: Радио и связь, 1986.—216 с.
6. Уайт Д. Р. Ж. Электромагнитная совместимость радиоэлектронных средств и непреднамеренные помехи. — М.: Сов. радио, 1977.—Вып. 1.—352 с.; 1978.—Вып. 2.—272 с.; 1979.—Вып. 3.—464 с.

LATITUDE PECULIARITIES OF ELECTROMAGNETIC COMPATIBILITY IN REGIONAL SATELLITE NETWORKS

A. S. Kurmanov and A. S. Mazmanishvili

The problem of calculating and visualizing the error probability P_{EM} for geostationary satellite networks is considered. Based on Monte—Carlo method, we built an algorithm for estimating the regional error probability in the digital satellite networks with phase manipulation. Calculations of simplified satellite networks for selected equatorial and mid-latitude regions are presented, the influence of increasing latitude on network compatibility is studied.