



ОГРАНИЧЕНИЯ НА ОРБИТАЛЬНОЕ КОНФИГУРИРОВАНИЕ В СПУТНИКОВЫХ СИСТЕМАХ ЦИФРОВОЙ СВЯЗИ

*КУРМАНОВ А. С., МАЗМАНИШВИЛИ А. С.,
СЛИПЧЕНКО Н. И.*

Рассматриваются возможные ограничения на орбитальное конфигурирование в спутниковых системах цифровой связи. Изучаются ограничения в задачах синтеза оптимальной конфигурации системы спутниковой связи на геостационарной орбите, решение которых облегчается в результате уменьшения динамических диапазонов значений параметров её компонент.

1. Введение

Современное состояние сетей связи ориентировано на информационное обеспечение потребителей в регионе и базируется на использовании спутников-ретрансляторов [1, 2]. Возрастание нагрузок на прием и передачу увеличивает и усложняет спутниковые системы связи (ССС), что, в свою очередь, приводит к трудностям при синтезе оптимальной конфигурации системы. В настоящей работе использован эффективный метод оценки вероятности ошибки в заданном регионе для выбранной конфигурации СССР. С помощью разработанного числового метода возможно сопоставлять различные варианты ретрансляции и приема в регионе. Рассмотрение ограничено цифровыми системами связи на геостационарной орбите (ГО). В результате расчета вероятности ошибки P_{eM} формируется набор региональных вероятностных карт, анализ которых позволяет делать выводы об электромагнитной обстановке в системе связи.

Спутники связи благодаря охвату обширных географических зон, удобству ретрансляции сигналов из одной точки многим потребителям и независимости стоимости от дальности связи влияют на характер наземных установок, обеспечивающих те или иные сферы деятельности, в частности, прямую передачу на большие расстояния цифровых данных.

Потенциальная опасность взаимных помех между спутниками была осознана задолго до принятия решения Международного Консультативного Комитета Радиосвязи о минимальном разnose соседних спутников на ГО, составляющем 2° . Ещё одной трудностью, свойственной лишь распределению программ звукового вещания, является необходимость установки земных станций практически произвольным образом.

Различные варианты конфигурирования СССР и характеристики приемных систем приводят к возможной системе связи в целом, потребительские свойства которой могут в той или иной степени удовлетворять современным требованиям. Перекрытие зон электромагнитного “освещения” спутниками-ретрансляторами, несогласованность индикатрис приемных станций могут обусловить относительно низкую электромагнитную совместимость системы связи в целом (достаточно легко синтезировать систему связи с недопустимо большой вероятностью ошибки $P_{eM}(x, y)$ практически во всех географических точках $\{(x, y)\}$ рассматриваемого региона). Задача синтеза оптимальной конфигурации системы связи сама по себе достаточно сложная, при этом поиск такой конфигурации в вычислительном отношении приводит к вариантам переборного типа в пространстве параметров высокой размерности. Поэтому важно с самого начала отсеять те из возможных вариантов конфигурирования, непригодность которых достаточно очевидна. Таким образом, целью настоящей работы является нахождение возможных ограничений на орбитальное конфигурирование в спутниковых системах цифровой связи. Число возможных ограничений также достаточно велико, в частности, они могут носить политический или нормативный характер. Вместе с тем вполне возможно рассмотреть те из ограничений, которые свойственны практически любой системе связи, поскольку определяются общими закономерностями формирования конфигураций с приемлемой электромагнитной совместимостью в целом. В настоящей работе изучены ограничения на орбитальное конфигурирование в спутниковых системах цифровой связи. Изучение основано на использовании информационных вероятностных карт, которые рассчитаны для случаев различных индексов фазовой манипуляции, различных широтных регионов (экваториальный и высокоширотный) и различного числа спутников в СССР.

2. Постановка задачи

В работе рассматривается СССР, основанная на фазовой манипуляции и предназначенная для передачи цифровой информации. Рассмотрим географический регион, ограниченный своими вершинами с заданными их угловыми координатами на поверхности Земли. Общий анализ эффективности использования орбиты при произвольной конфигурации СССР достаточно сложен. Для исследования помехоустойчивости обычно применяют упрощенную модель, в рамках которой имеются следующие основные допущения [3, 4]:

- а) на всей орбите находятся идентичные спутники, равноотстоящие друг от друга;
- б) все спутники несут на борту однолучевые антенны с глобальной зоной обслуживания и одинаковой поляризацией;
- в) работа осуществляется при ясных погодных условиях;
- г) все спутники передают когерентно фазоманипулированные несущие с идентичными параметрами;

д) предполагается наличие идеального фазового приемника, не искажающего сигнал.

Тогда основная формула [1-3] расчета вероятности ошибки при передаче одного бинарного символа в точке региона с координатами (x, y) в условиях множественных помех имеет вид:

$$P_{eM}(x, y) = \mathbf{E} \left[\operatorname{erfc}(\rho(x, y) \sin(\pi / M) + \rho(x, y) Z(x, y)) \right], \quad (1)$$

где $\mathbf{E}[\cdot]$ – символ безусловного математического ожидания относительно случайных возмущений источников помех в системе; $\operatorname{erfc}(x)$ – дополнительная функция ошибок; $\rho(x, y) = P_s / P_n$ – величина отношения сигнал/шум по мощности в точке приема; P_s – мощность сигнала на входе приемника; P_n – полная мощность шума на входе приемника; M – число положений фаз при фазовой манипуляции; Z – случайная величина, описывающая влияние помехи. Для помехи, связанной с соседними спутниками, Z равна (далее указания на координаты (x, y) опущены)

$$Z = \sum_{j \in C}^K R_j \cos(\varphi_j), \quad (2)$$

при этом каждая из величин φ_j случайна и равномерно распределена на интервале фаз $(0, 2\pi)$; K – число мешающих космических станций (КС), а набор амплитуд $\{R_j\}$ вычисляется по следующему выражению:

$$R_j = \sqrt{\left[G_{es}(\theta_j) G_{ss}(\beta_j) P_j \right] / \left[G_{es, \max}(\theta_j) G_{ss, \max}(\beta_j) P_0 \right]}. \quad (3)$$

Здесь $G_{es, \max} = \eta(\pi D / \lambda)^2$ – коэффициент усиления мощности антенны земной станции (ЗС); η – коэффициент использования поверхности антенны ЗС; D / λ – отношение апертуры к длине волны ЗС; θ_j – топоцентрический угол разнеса между “полезным” и j -м “мешающим” спутником на ГО; $G_{es}(\theta_j)$ – соответствующий коэффициент усиления мощности антенны ЗС в направлении на j -й источник мешающего сигнала при угловом смещении θ_j ; $G_{ss, \max} = 44.44 - 20 \lg \gamma$ – максимальное усиление антенны КС в основном лепестке, dB; γ – угловой размер сечения луча антенны КС; $G_{ss}(\beta_j)$ – соответствующий коэффициент усиления мощности j -й “мешающей” КС в направлении на ЗС под углом β_j от направления максимального излучения (точки прицеливания); P_0 – мощность бортового передат-

чика “полезной” КС; P_j – мощность бортового передатчика j -й “мешающей” КС.

Соотношения (2) и (3) дают возможность полностью математически поставить задачу нахождения вероятности ошибки P_{eM} (1).

3. Алгоритмы расчета

Из числа возможных методов нахождения значений P_{eM} рассматривались три: метод гауссовой аппроксимации, метод трапеций численного интегрирования и метод статистического моделирования. Из них первый удобен при выполнении оценок, метод статистического моделирования применяется в том случае, когда число слагаемых в (1) более 3, т.е. для систем связи, содержащих 4 и более спутников. При меньшем числе спутников удобно пользоваться прямыми методами численного интегрирования.

Метод гауссовой аппроксимации основан на возможности использования в (1) нормальной плотности для помехи Z при усреднении. Принимая для первых моментов помехи Z , что

$$\langle Z \rangle = 0, \langle Z^2 \rangle = \sigma_z^2 = \frac{1}{2} \sum_{j \in C}^K R_j^2, \quad (4)$$

после интегрирования найдем приближенно

$$P_{eM}(x, y) \approx \frac{1}{\sqrt{\pi} \rho S_M \sqrt{1 + 2\rho^2 \sigma_z^2}} \exp\left(-\frac{\rho^2 S_M^2}{1 + 2\rho^2 \sigma_z^2}\right), \quad (5)$$

где $S_M = \sin(\pi / M)$ и везде $\rho = \rho(x, y)$, $\sigma_z = \sigma_z(x, y)$. Пренебрежем в (5) множителем перед экспонентой и потребуем выполнения условия, чтобы $P_{eM} \leq 10^{-8}$ (область устойчивого приема в регионе). Это условие в отсутствие помехи будет выполняться для тех точек с координатами (x, y) , для которых $\rho^2 S_M^2 \geq \ln 10^8$. Обозначим величину отношения сигнал/шум в граничных точках, для которых справедливо $\rho^2 S_M^2 = \ln 10^8$, через ρ_{-8}^2 . С учетом того, что речь идет о тех точках, для которых выполняется неравенство $\rho S_M \gg \rho \sigma_z$, в случае присутствия помехи получим для области устойчивого приема

$$\frac{\rho^2}{\rho_{-8}^2} = \frac{1}{1 - 2\rho_{-8}^2 \sigma_z^2} > 1. \quad (6)$$

Это неравенство может иметь место лишь внутри односпутниковой ССС и таким образом возможно оценить область устойчивого приема в присутствии помех.

Метод трапеций численного интегрирования для кратных интегралов сводится к рекурсивному вызову процедуры однократного интегрирования [5]. Так как глубина рекурсии равна кратности интегрирования K , т.е. числу спутников в ССС, временной

ресурс и сложность такого алгоритма зависит экспоненциально от K для принятой точности расчета.

Метод статистического моделирования. Из выражения (1) следует, что искомую величину P_{eM} можно интерпретировать как безусловное математическое ожидание относительно всех возможных реализаций случайной величины Z (2). В работе был использован метод статистических испытаний, который часто применяется при моделировании случайных явлений [6,7]. При расчете вероятности ошибки величину $P_{eM}(x, y)$ находили путем вычисления оценки P_{eM} относительно реализаций случайной величины P_{eM} заданного выборочного объема N . Объем выборки для любых координат (x, y) и любого значения ρ подбирался так, чтобы относительная погрешность оценки P_{eM} не превосходила заданной величины α , которая в этой работе составляет 5%.

Здесь рассмотрено случайное событие, заключающееся в том, что относительная погрешность оценки P_{eM} величины P_{eM} не превышает α , и получена следующая зависимость объема выборки N от физических параметров задачи:

$$N \approx 2\rho^2 \Omega_C (\sin(\pi / M) + \Omega_C)(\gamma / \alpha)^2. \quad (7)$$

В этом выражении $\Omega_C = \sum_{j \in C} R_j$ – максимальное значение помехи; $\gamma = \Phi^{-1}(q)$; $\Phi(q)$ – функция Лапласа; q – вероятность указанного события.

На базе статистического алгоритма расчета вероятности ошибки $P_{eM}(x, y)$ и распространения его на набор пространственных узлов $\{(x, y)\}$ были разработаны числовой алгоритм и программное обеспечение для расчета и визуализации информационных карт вероятности ошибок для выбранной конфигурации системы связи в заданном регионе.

4. Вероятностные карты

Перейдем к численным результатам. На рис. 1-8 рисунков содержат 24 информационные вероятностные карты для $P_{eM}(x, y)$, сгруппированные по 3 для экваториального и высокоширотного регионов соответственно. На всех этих картах точки нацеливания спутников обозначены кружочками. Приведенные карты отвечают географическим регионам, которые имеют размеры в градусах $(-10.0^\circ; 10.0^\circ)$ по долготе и $(-10.0^\circ; 10.0^\circ)$ по широте. Рис. 2, 4, 6 и 8 отличаются от рис. 1, 3, 5 и 7 тем, что вся зона обслуживания (точки нацеливания) как целое поднята на 50.0° вверх (на Север) по широте, а спутниковая конфигурация и характеристики передающих и приемных антенн остаются такими же. Рис. 5–8 в свою очередь дублируют рис. 1–4 за исключением того, что индекс фазовой модуляции M для них увеличен в два раза.

Основной тенденцией, прослеживаемой на каждой группе карт, является зависимость помеховой обстановки в регионе от углового расстояния спутников на орбите $\Delta\theta$. Эта величина – основной параметр, определяющий помехоустойчивость соседних спутников. Чем дальше на орбите расположен мешающий j -й спутник, тем меньше значение соответствующей величины R_j и, следовательно, случайная величина Z менее повлияет на значение вероятности ошибки P_{eM} . Важную роль здесь играет угловая избирательность приемной антенны ЗС, так как её значение входит в числитель формулы (2), но в данной работе это не рассматривается.

При моделировании были использованы данные, наиболее характерные для эксплуатируемых в настоящее время систем. Приведем основные характеристики рассматриваемой системы:

- коэффициент использования поверхности антенны ЗС $\eta = 0,5$;
- отношение апертуры к длине волны ЗС $D / \lambda = 100$;
- полная мощность шума на входе приемника $P_n = 40$ dBW;
- мощность бортовых передатчиков КС $P = 100$ W.

На рис. 1 приведена группа из трёх информационных вероятностных карт, которые отражают помеховую обстановку в регионе с двумя спутниками. Индекс фазовой модуляции M в выбранной системе равен 2. Угловой раскрыв передающих антенн каждого из спутников и приёмных антенн ЗС равен 1° . Точки нацеливания имеют координаты $(0^\circ; -3^\circ)$ и $(0^\circ; 3^\circ)$ соответственно, а положение спутников на орбите меняется следующим образом:

- рис.1,а: -0.6° и 0.6° ; рис.1,б: -0.9° и 0.9° ; рис.1,в: -1.2° и 1.2° .

Рис.2, как было указано выше, отличается от рис.1 поднятием на 50.0° по широте, а рис.5 и рис.6 повторяют рис.1 и рис.2, но с индексом фазовой модуляции M , равным 4.

На рис.3 приведены информационные карты для 3-спутниковой системы связи. Индекс фазовой модуляции равен 2. Угловой раскрыв передающих антенн каждого из спутников равен 1° , угловой раскрыв приёмных антенн ЗС составляет 1° для крайних и 0.6° для среднего спутника. Точки нацеливания имеют координаты $(-3^\circ; -3.5^\circ)$, $(2^\circ; 0^\circ)$ и $(-3^\circ; 3.5^\circ)$ соответственно, а положение спутников на орбите меняется следующим образом:

- рис.3,а: -1.5° , 0.0° и 1.5° ; рис.3,б: -1.7° , 0.0° и 1.7° ;
- рис.3,в: -1.9° , 0.0° и 1.9° .

Высокоширотный аналог данной конфигурации приведен на рис.4, а на рис.7 и рис.8 индекс фазовой модуляции увеличен до 4.

5. Обсуждение численных результатов

При сопоставлении пар рис. 1-2, 3-4, 5-6 и 7-8 отчетливо видна широтная зависимость электромагнитной совместимости в рассматриваемой ССС. В

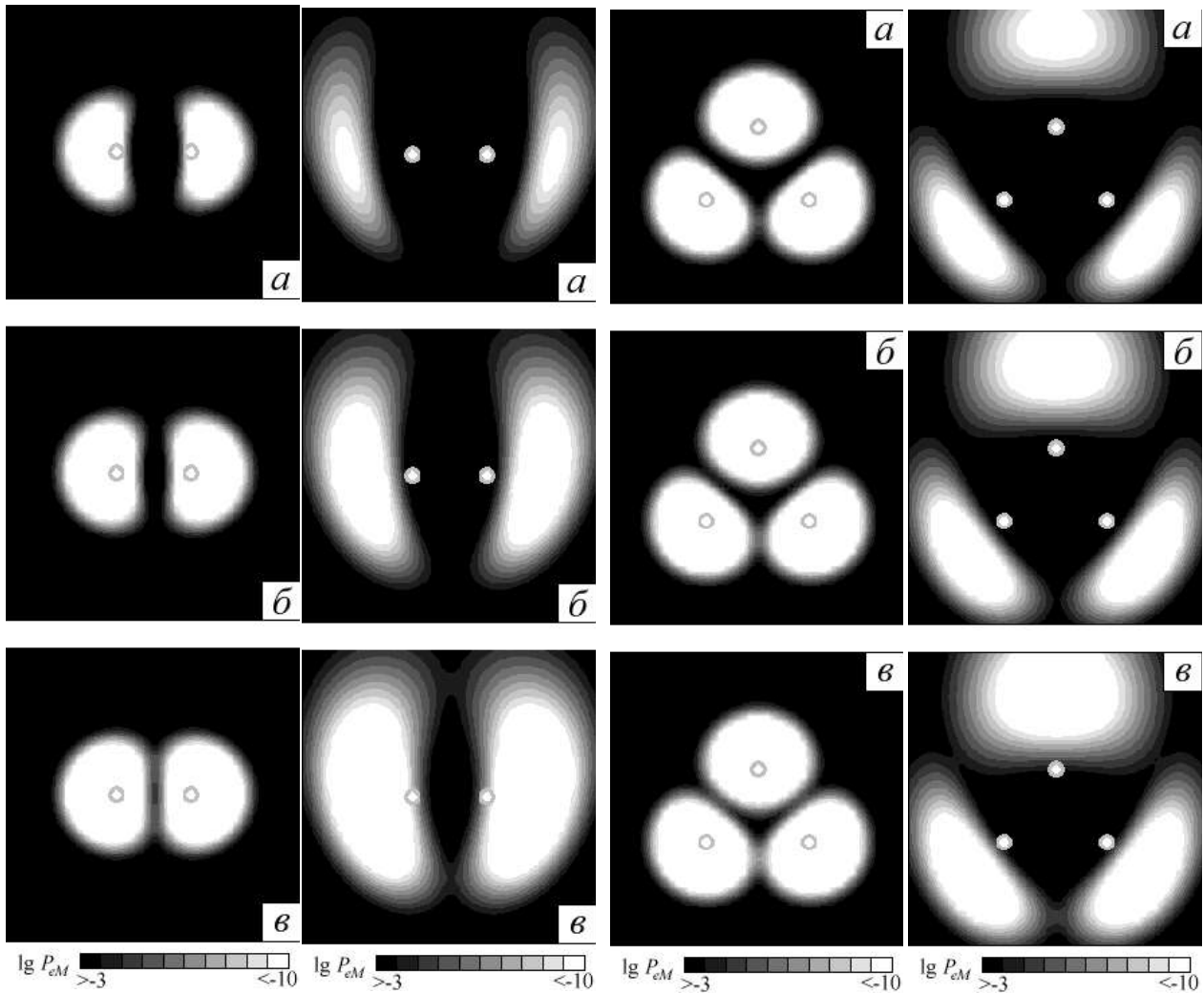


Рис.1. Информационные карты для экваториального региона при $M=2$ и углом рассогласования $\Delta\theta$: а – 1.2° ; б – 1.8° ; в – 2.4°

Рис.2. Информационные карты для высокоширотного региона при $M=2$ и углом рассогласования $\Delta\theta$: а – 1.2° ; б – 1.8° ; в – 2.4°

Рис.3. Информационные карты для экваториального региона при $M=2$ и углом рассогласования $\Delta\theta$: а – 1.5° ; б – 1.7° ; в – 1.9°

Рис.4. Информационные карты для высокоширотного региона при $M=2$ и углом рассогласования $\Delta\theta$: а – 1.5° ; б – 1.7° ; в – 1.9°

результате триангуляционного увеличения проекции электромагнитного освещения в более широтном регионе увеличился размер области перекрытия от соседних спутников. Это привело к относительному уменьшению области уверенного приема $P_{eM} = 10^{-8}$. Видно, что хотя зона уверенного приёма при отсутствии взаимных помех достаточно велика, ее реальные размеры оказываются заметно меньшими, если принять во внимание влияние соседних спутников, работающих на той же частоте.

Аналогичные изменения имеют место с увеличением индекса фазовой манипуляции M (рис.5–8). Эти закономерности можно пояснить с помощью выражения (6) и зависимостей, приведенных на рис.9. На нем показан ход кривых P_{eM} в зависимости от величины отношения сигнал/шум ρ^2 , выполненных для различных индексов модуляции M и для разных угловых интервалов $\Delta\theta$ между $K = 3$ спутниками-ретрансляторами на ГО. Для выполнения расчетов

согласно выражению (1) на линии Спутник—Земля в качестве набора амплитуд $\{R_j\}$ принято использовать следующую рекомендуемую в [8] последовательность $R_j = 0.18(j\Delta\theta)^{-5/4}$, где $j = 1, \dots, K$. Эта последовательность была использована при выполнении расчетов P_{eM} , результаты которых приведены на рис.9.

При сопоставлении рис.1–4 с рис.5–8 наблюдается заметное уменьшение зон уверенного приёма, как если бы была уменьшена энергия передатчиков. Этот эффект непосредственно виден на рис.9, где кривые, соответствующие одинаковым $\Delta\theta$ и большим M , смещаются как целое вправо, не претерпевая каких-либо значительных искажений. Таким образом, увеличив индекс модуляции, необходимо также поднять уровень излучаемой энергии, с тем чтобы помеховая обстановка осталась прежней. Отметим, что в силу (1) и (6) увеличение величины отношения сигнал/шум одновременно у всех компонент ССС не приведет к улучшению электромагнитной обстановки в целом.

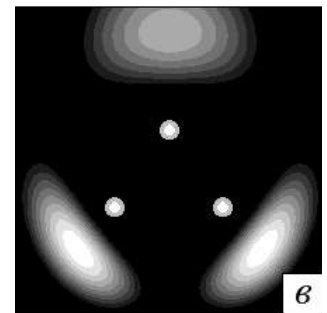
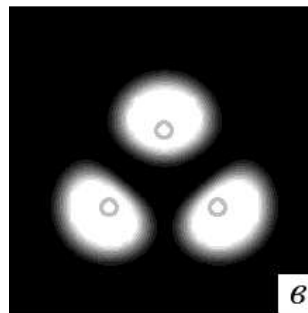
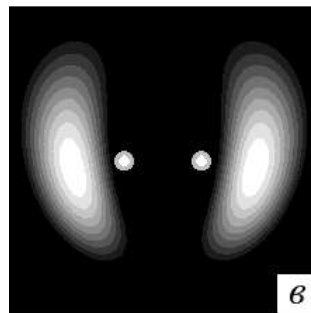
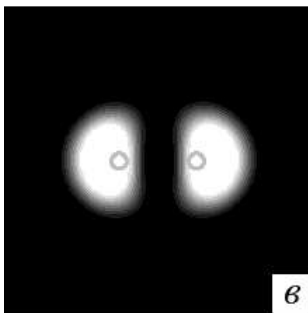
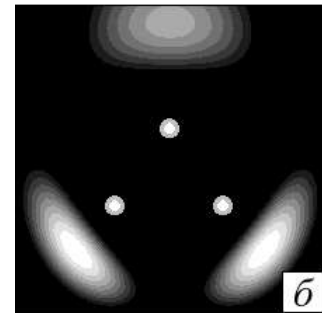
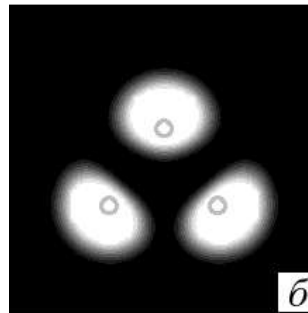
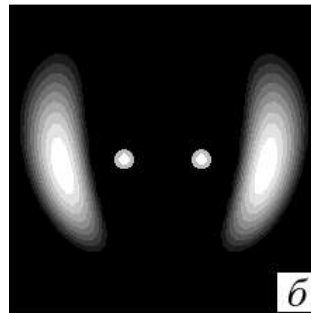
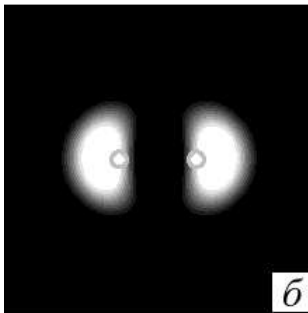
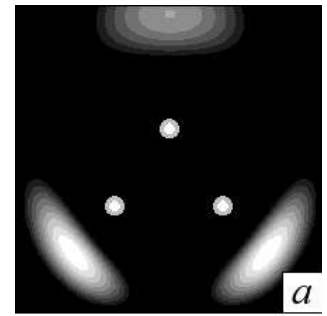
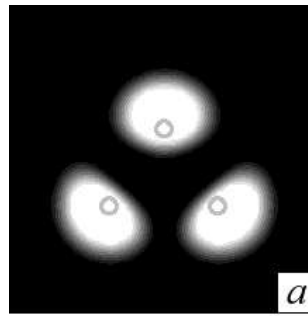
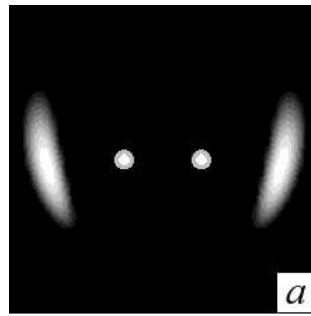
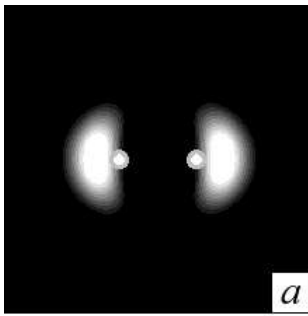


Рис.5. Информационные карты для экваториального региона при $M=4$ и углом рассогласования $\Delta\theta$: а – 1.2° ; б – 1.8° ; $\epsilon - 2.4^\circ$

Рис.6. Информационные карты для высокоширотного региона при $M=4$ и углом рассогласования $\Delta\theta$: а – 1.2° ; б – 1.8° ; $\epsilon - 2.4^\circ$

Рис.7. Информационные карты для экваториального региона при $M=4$ и углом рассогласования $\Delta\theta$: а – 1.5° ; б – 1.7° ; $\epsilon - 1.9^\circ$

Рис.8. Информационные карты для высокоширотного региона при $M=4$ и углом рассогласования $\Delta\theta$: а – 1.5° ; б – 1.7° ; $\epsilon - 1.9^\circ$

Наконец, из дополнительно прослеженных зависимостей вытекает, что минимально допустимый угловой интервал на ГО, составляющий $\Delta\theta = 2^\circ$, для высокоширотных ССС (или ССС с большим индексом модуляции) должен быть увеличен.

В общем случае выполнение анализа помехоустойчивости конкретной ССС на основе выражений (1) или (6) вызывает достаточно большие трудности и обуславливает проведение числовых моделирующих расчетов.

6. Заключение

Из приведенных рисунков видно, что существует возможность надежного информационного обеспечения при передаче со спутников на ГО, что и имеет место на практике. Важно отметить, что между зонами уверенного приема всегда существуют промежуточные зоны, прием в которых заведомо хуже вследствие взаимовлияния пере-

датчиков. Размер этих зон возрастает как при переходе от экваториального к высокоширотному региону, так и при увеличении индекса фазовой манипуляции (при прочих неизменных параметрах ССС). Уменьшить эти зоны информационной недостаточности при одночастотном режиме передачи возможно лишь путем улучшения угловой избирательности

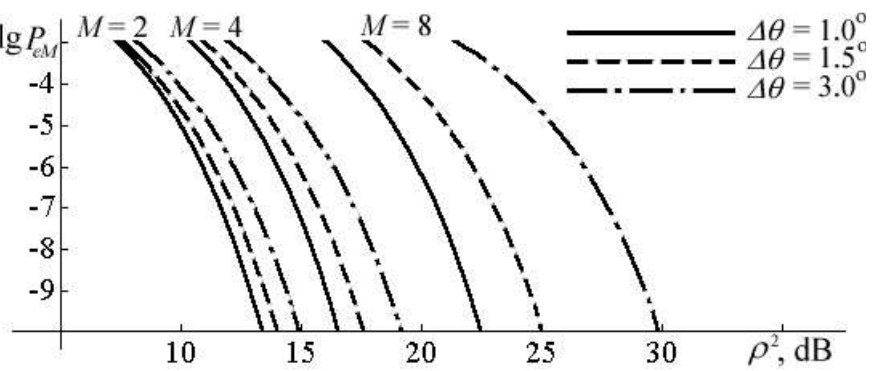


Рис.9. Зависимости вероятности ошибки P_{eM} от величины отношения сигнал/шум ρ^2

приемника, что сопряжено с техническими затруднениями [2,8]. Синтез ССС с заданными энергетическими характеристиками и высокой помехоустойчивостью возможен лишь при выполнении достаточно пространственно-углового разнесения, требования на которое увеличиваются по мере роста широты региона или индекса модуляции.

Полученные численные характеристики вероятности ошибки позволяют оценить степень электромагнитной совместимости и помехозащищенности системы при передаче и приеме сигналов потребителями в регионе. На основе таких характеристик можно решать задачу синтеза оптимальной конфигурации системы спутниковой связи, решение которой облегчается в результате значительного уменьшения динамических диапазонов значений параметров её компонент.

Общую тенденцию, которую примет спутниковая связь, и будущие области её применения [9,10] можно видеть в сохранении темпов технического прогресса в отношении основных параметров ССС: возможности создаваемых спутников, размеры и стоимость ЗС, используемых в сетях связи, будут расширяться, а их размеры и стоимость будут снижаться, при этом число ЗС в каждой сети будет расти. Далее, разработка новой архитектуры сетей связи откроет возможность для расширения цифровых информационных сетей в тех регионах, где в настоящее время отсутствует необходимая наземная инфраструктура телефонной связи. Наконец, появление бытовых ЗС для прямого приема программ со спутников позволит начать создание сети индивидуальных приемопередающих цифровых ЗС.

Эффективное использование космического сегмента сети важно, поскольку, во-первых, его стоимость составляет значительную часть общей стоимости сети, во-вторых, емкость ГО и диапазонов частот, выделенных для спутниковой связи, представляют собой ограниченный природный ресурс связи. Перегруженность этого ресурса частично наблюдается уже

сейчас, а его нехватка еще сильнее будет ощущаться в ближайшем будущем. Поэтому необходимо по возможности полнее использовать орбиту и полосы частот, занимаемые спутником.

Литература: 1. *Калашиков 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. *Jeruchim M. C.* A Survey of Interference Problems and Applications to Geostationary Satellite Networks // Proc. IEEE, 1977, 65, №3. P.317-331. 4. *Rosenbaum A.S.* PSK Error Performance with Gaussian Noise and Interference // Bell Syst. Tel. J., 1974, 2, №2. P.413-442. 65. 5. *Форсайт Дж., Малькольм М., Моулер К.* Машинные методы математических вычислений. М.: Наука, 1980. 279 с. 6. *Бусленко Н.П., Шрейдер Ю.А.* Метод статистических испытаний. М.: Физматгиз, 1961. 280 с. 7. *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. 8. *Бородич С.В.* ЭМС наземных и космических радиослужб. М.: Радио и связь, 1990. 383 с. 9. *Bartholome P.* Digital Satellite Networks in Europe // Proc. IEEE, 1984, 72, №11. P.1469-1482. 10. *Braun W.H., Keigler J.E.* RCA Satellite Networks: High Technology and Low User Cost // Proc. IEEE, 1984, 72, №11. P.1483-1505.

Поступила в редколлегию 10.11.99

Рецензент:

Курманов Алексей Сергеевич, аспирант кафедры САУ ХГПУ. Научные интересы: теория связи, прикладная математика. Адрес: Украина, 61002, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел. 40-00-56.

Мазманишвили Александр Сергеевич, д-р физ.-мат. наук, профессор кафедры САУ ХГПУ. Научные интересы: теория цифровой связи, статистическая радиофизика, прикладная математика. Адрес: 61002, Украина, Харьков, ул. Фрунзе, 21, тел. 40-00-56, e-mail: mazmani@kpi.kharkov.ua.

Слипченко Николай Иванович, канд. техн. наук, доцент кафедры МЭПУ ХТУРЭ, проректор по научной работе ХТУРЭ. Научные интересы: моделирование процессов формирования интегральных структур, разработка теории многофункциональных частотных элементов. Адрес: Украина, 61166, Харьков, пр. Ленина, 14, тел. 47-01-07.