

СПУТНИКОВАЯ СВЯЗЬ

УДК 621.396.931+621.396.945.2+004.7

СИСТЕМЫ СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ С МНОГОЛУЧЕВЫМ ПОКРЫТИЕМ ЗОНЫ ОБСЛУЖИВАНИЯ

Л. Я. Кантор, д.т.н.; l.cantor@yandex.ru

Представлено элементарное рассмотрение фундаментальных особенностей систем спутниковой связи с многолучевым покрытием (СССМП) в сравнении с традиционными сетями с однолучевым покрытием зоны обслуживания (ССОП).

Ключевые слова: спутниковая связь; многолучевое покрытие; электромагнитная совместимость (ЭМС).

Введение. Сегодня очевидно, что развитие систем спутниковой связи существенно тормозится реальной перегрузкой геостационарной орбиты [1,2]. Эта ситуация усугубляется трудно преодолимыми недостатками действующей международной процедуры распределения орбитально-частотного ресурса [3]. В [4] на основе анализа возможных путей решения этой проблемы показано, что в сложившихся условиях наиболее перспективным и возможно единственным путем является создание сетей спутниковой связи (ССС) с многолучевым покрытием обслуживаемой зоны (СССМП) и повторным (многократным) использованием полосы частот [5,6] (см. рисунок, заимствован из [7]). Однако все действующие рекомендации и руководства по проектированию СССР разработаны применительно к сетям с однократным покрытием [8,9], и поэтому полезным представляется сформулировать основные особенности систем спутниковой связи с многолучевым покрытием. В данной статье под СССР понимается система с большим числом узких лучей, создающих сплошное покрытие зоны обслуживания (или части этой зоны), показатели СССР сравнимаются с системой, покрывающей ту же территорию одним лучом.

В настоящее время большинство геостационарных спутников связи и вещания имеют несколько широких лучей в каждом из диапазонов частот, разделяемых по пространству (зоне покрытия), поляризации, полосе частот. Параметры системы в этом случае анализируются для каждого отдельно взятого луча с применением всех соотношений и процедур, относящихся к однолучевым сетям [8,9].

СССМП появились в последние годы в Ка-диапазоне из-за необходимости преодолеть затухание сигнала в осадках, а также в сетях подвижной спутниковой связи по причине чрезвычайно ограниченной разрешенной полосы частот для этих систем и в целях уменьшения мощности абонентского терминала. Однако ограниченный ресурс геостационарной орбиты, по мнению автора, заставляет обратиться к СССР и в других случаях, и поэтому полезно оценить основные свой-

ства таких систем независимо от диапазона частот и назначения сети.

Многолучевое покрытие (МП) строится на основе многолучевой антенны спутника с целью многократного использования полосы частот. Однако, из-за необходимого разноса лучей с той же полосой частот во избежание неприемлемых взаимных помех между ними, сплошное покрытие зоны приходится создавать с помощью других лучей, работающих в других участках полосы частот. В результате возникает ячеистая структура, содержащая m практически аналогичных ячеек с n лучами в каждой, причем в каждом луче используется часть всей выделенной для сети полосы частот $\Delta f/n$. При удобной для рассмотрения круглой (шестигранной) аппроксимации формы луча, в случае сплошного покрытия территории, чаще всего рассматривается и применяется разделение всей имеющейся полосы частот на четыре равные части, т.е. $n = 4$, так что для построения сети имеются n независимых (не создающих помех друг другу «разноцветных»/разночастотных) номиналов лучей (рис. 1, «4-частотная» модель).

Возможно построение сети и при других значениях n . Однако увеличение n усложняет конструкцию спутника, хотя и позволяет уменьшить собственные внутрисистемные межлучевые помехи между «одноцветными»/одночастотными лучами. Уменьшение n (до трех и даже двух) дает

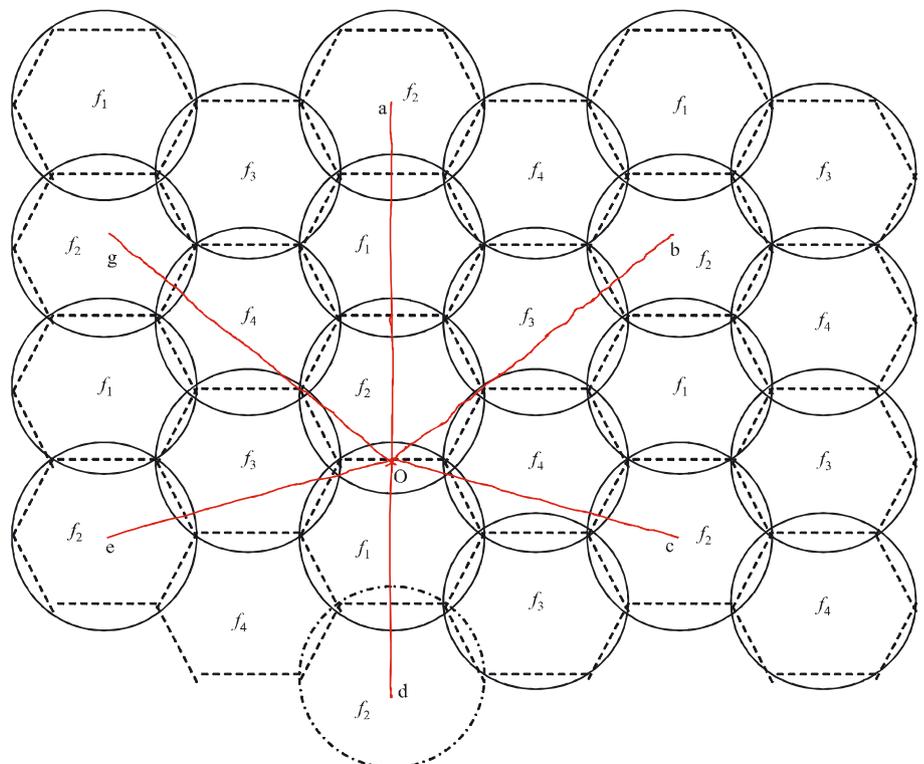


Схема многолучевого покрытия зоны обслуживания

возможность увеличить число повторов одноцветных лучей m , но при этом значительно возрастает внутрисистемная помеха и связанные с этим потери. Оптимальное значение n зависит от необходимого для выбранных проектировщиком сигналов отношения сигнала к тепловому шуму ($C/Ш$).

Для разделения лучей, кроме полосы частот, может быть использована различная поляризация. В данной статье для простоты изложения принимается, что поляризационное разделение используется в каждом луче, увеличивая его емкость в два раза, а разделение лучей осуществляется только по полосе частот. Величина m определяется соотношением между площадью зоны элементарного (узкого) луча и размером зоны обслуживания; в реализованных и проектируемых сетях рассмотрены значения m от 3–5 до 20–30. Очевидно, что в приближенном рассмотрении, не учитывая шарообразность Земли и географические особенности, при одинаковом числе повторов каждого из n участков полосы частот общее число лучей равно mn . Во столько же раз зона покрытия одного луча меньше общей зоны покрытия, а число повторов полосы частот равно m . В общем случае, при неодинаковых размерах ячеек сетки, суммарное число лучей определяется конкретным проектированием.

Энергетические соотношения. Пусть в стандартной однолучевой ССС мощность передатчика спутника, подводимая к антенне, равна P , и при этом у поверхности Земли в полосе частот Δf создается спектральная п.п.м., необходимая для достижения отношения $C/Ш$, обеспечивающего прием сигналов земными станциями (ЗС) с необходимой достоверностью. При этом из-за уменьшения зоны покрытия луча, в случае СССМП, для каждого луча понадобится мощность передатчика спутника P/mn , а из-за сокращения полосы частот сигнала в луче в n раз — еще меньшая, а именно P/mn^2 . При этом суммарная мощность передатчиков (передатчика), подводимая к антенне (антеннам) спутника, составит $(P/mn^2) mn = P/n$, т.е. применение МП позволяет получить существенный энергетический выигрыш в необходимой общей мощности передатчиков спутника, и, следовательно, в общей мощности источников питания космической станции.

На линии вверх (Земля — спутник), вследствие возросшего в mn раз усиления приемной антенны спутника, мощность передатчика каждой земной станции (ЗС) может быть уменьшена на столько же раз. Это представляется также весьма важным преимуществом СССМП, особенно при применении такой системы в Ка-диапазоне, где необходим энергетический ресурс для преодоления затухания в осадках, а также в сетях подвижной связи — для уменьшения мощности передатчика подвижной ЗС. Точнее, следует говорить об уменьшении э.и.и.м. ЗС, т.е. выигрыш можно частично использовать для уменьшения размеров антенн ЗС.

В действительности энергетический выигрыш окажется ниже по ряду причин. Сформировать идеальное покрытие, например из лучей-шестиугольников или окружностей, как показано на рис.1, практически невозможно. Реально контуры зоны покрытия каждого луча будут близки к эллипсам из-за шарообразности Земли, а также из-за трудностей, возникающих при точном формировании лучей антенной (или антеннами) спутника. Для создания сплошного покрытия площадь зоны покрытия каждого луча должна быть больше идеального многоугольника при соответственно меньшем усилении антенны спутника. Эти потери можно оценить в 20–30%. Кроме того, формирование многолучевого покрытия неизбежно приводит к более сложной конфигурации фидерного тракта и облучающей системы многолучевой антенны спутника, что также влечет за собой дополнитель-

ные энергетические потери в передающем тракте спутника и к увеличению шумовой температуры его приемного тракта. Наконец, многократное использование полосы частот приводит к возникновению внутрисистемных перекрестных помех между лучами, использующими одну и ту же полосу частот. В [7] для конфигурации рис.1 показано, что при семикратном повторении частот ($m = 7$) суммарная помеха одному лучу от шести других лучей может составить $P/C = -16,5$ дБ (где P/C — отношение помехи к сигналу с учетом суммарной помехи от шести других лучей), что сопоставимо с суммарной помехой от других сетей фиксированной спутниковой службы и наземной фиксированной службы (которая должна составлять до 27% от собственных тепловых шумов [10]). При этом возникнет снижение отношения $C/Ш$ (например, на 1дБ, если без учета межлучевой помехи оно составляло 10 дБ).

Следует также иметь в виду, что при размещении на спутнике многолучевой антенны или многих (нескольких) антенн масса и стоимость космического аппарата (КА) возрастает. Это объясняется необходимостью увеличивать размер бортовой антенны (площадь рефлектора — примерно в mn раз), что может оказаться критичным, например, для С-диапазона. Кроме того, возрастают затраты, связанные с выводением спутника на орбиту.

Пропускная способность СССМП. Если, как предполагалось выше, отношение $C/Ш$ на входе приемников ЗС такое же, как и в случае ССС без МП, то пропускная способность каждого луча на линии вниз определяется его полосой пропускания, уменьшенной в n раз, т.е. будет меньше пропускной способности ССС без МП в n раз. Таким образом, пропускная способность ячейки, состоящей из n лучей и занимающей всю выделенную сети полосу частот, такая же, как системы без МП, и общая пропускная способность всей сети СССМП оказывается выше чем однолучевой системы в m раз при одинаковой с однолучевым спутником спектральной п.п.м. В этом и есть главная цель создания СССМП. Потери пропускной способности из-за указанной выше внутрисистемной помехи между «одноцветными» лучами могут быть оценены с помощью таблиц, приведенных в [11] и составят от 6 до 12% (если без учета этой помехи отношение $C/Ш$ составляло около 10 дБ).

Если приемная антенна спутника СССМП образует такую же конфигурацию многолучевого покрытия, как и передающая антенна, то уменьшение пропускной способности из-за межлучевых помех на линии вверх будет таким же, как на линии вниз, и определяться соотношением между собственными шумами в системе (тепловые, нелинейные, помехи от других сетей) и межлучевой помехой. В некоторых случаях может оказаться существенным то обстоятельство, что в полосе частот одного луча из-за ограниченной полосы будет обслуживаться соответственно меньшее число ЗС, что ухудшит статистику загрузки луча, т.е. вероятность отказов в получении доступа к связи или вероятность задержки передачи информации возрастет. Это эквивалентно некоторой потере пропускной способности (при обычно применяемой системе доступа с незакрепленными за ЗС каналами связи). Возможность перераспределения емкости между лучами решила бы проблему, но требует заметного усложнения оборудования спутника — переменной полосы частот, перераспределения мощности между лучами. Технические решения для этого в настоящее время известны и применялись в реальных сетях.

Особенности ЭМС СССМП. На линии вниз помехи создаются спутником СССМП земным станциям других сетей фиксированной спутниковой службы (ФСС). Если зоны об-

служивания СССМП и соседней системы не перекрываются (что вероятно, например, в полосе частот Плана ФСС), то для ЗС соседней системы ситуация в результате перехода создающей помеху системы к СССМП — улучшится. Это объясняется тем, что помеха от ближайших лучей СССМП будет меньше из-за более быстрого спада усиления антенны узкого элементарного луча, а суммирование помех от других $(m - 1)$ «одноцветных» лучей почти не увеличит помеху, поскольку из-за необходимости уменьшения внутрисистемных помех между лучами СССМП (например, на уровне -25 дБ, как принято в [11]) суммарная помеха от этих лучей будет не более $(10 \log (m-1) - 25)$ дБ относительно помехи от ближайшего луча (вследствие спада усиления бортовых антенн за пределами первого лепестка ДН [12]). Если же зоны обслуживания сетей перекрываются, то ЗС соседней сети, попавшая в зону обслуживания СССМП, будет испытывать такую же помеху, как и в случае однолучевой сети, от луча, в зону которого она попала, плюс незначительная добавка, не более $(10 \log (m-1) - 25)$ дБ, от других «одноцветных» лучей СССМП. Напомним, в статье сравнивается СССМП с однолучевой сетью при условии равной спектральной п.п.м. на линии вниз и вверх. Отметим также, что приведенные в этом абзаце соображения касаются только того участка полосы частот, в котором работает луч, где оказалась ЗС соседней сети; для других $(n-1)$ участков полосы частот приведенная оценка является верхним пределом.

Если приемная антенна спутника СССМП создает ту же конфигурацию лучей, что и передающая, то приведенные в предыдущем абзаце соображения пригодны в отношении воздействия помех от ЗС соседней сети на спутник сети с МП, а именно: достаточно определять помеху ближайшему (или худшему — при перекрытии зон) лучу; помехи остальным лучам будут меньше. Важно отметить, что помеха будет создаваться всем «одноцветным» лучам, т.е. число каналов связи, одновременно подверженных помехе, возрастет в m раз. Однако число подверженных помехе каналов и станций не учитывается действующими критериями допустимой помехи: критерии ограничивают только величину помехи для худшего случая и поэтому увеличение числа подверженных помехе каналов связи не повлияет на оценку ЭМС.

Таким образом, для этих двух случаев расчеты ЭМС могут выполняться как обычно, с учетом п.п.м. и параметров парциального луча (при неперекрывающихся зонах покрытия), и условия ЭМС мало отличаются от случая однолучевых систем.

Иная ситуация возникает при анализе помех спутнику соседней сети от ЗС СССМП на линии вверх. Поскольку эти ЗС в m лучах могут работать одновременно, направлены на тот же спутник и имеют примерно одинаковый топоцентрический угловой разнос относительно спутника соседней сети, то мощность помехи ему возрастет существенно — в m раз, т.е. помеховая ситуация в этом направлении ухудшится. Проблема может быть решена в наиболее важном случае — при использовании СССМП для сети Интернет — благодаря известной несимметрии потоков информации на линии вверх (запрос от земных станций) и вниз. Кроме того, указанный выше выигрыш в э.и.м. ЗС в m раз, если он использован для уменьшения мощности передатчиков ЗС, может с избытком компенсировать эффект от суммирования помех от многих лучей.

В обратном направлении — от спутника соседней сети в сторону ЗС СССМП — ситуация также отличается от случая помех системе с ОП, так как они будут создаваться большему числу ЗС, а именно — всем земным станциям

в m лучах с совпадающими полосами частот. Однако, как указано выше, поскольку критерием допустимой помехи является ее величина, а число ЗС, подверженных помехе, действующими критериями не учитывается, то очевидно, что оценка помехи для этого случая не отличается от ситуации ССОП-ССОП.

Общий вывод в отношении особенностей ЭМС вследствие перехода от СССОП к СССМП — обеспечение ЭМС с другими сетями спутниковой связи при соответствующем выборе параметров СССМП не затруднено. Более того, может быть достигнута эффективная координация близко расположенных спутников в случае, если на обеих сетях используется многолучевое покрытие и их структуры (частотные планы) согласованы. В идеальном случае такие две сети могут создать сплошное покрытие на непосредственно примыкающих друг к другу территориях. Разумеется, это потребует кропотливой работы по согласованию частотных планов покрытия и доброй воли (точнее, взаимной заинтересованности) сторон. Таким образом СССМП могут оказаться весьма перспективными и с точки зрения ЭМС.

ЭМС с наземными сетями. Предельные плотности потока мощности, создаваемой СССМП, должны быть ограничены теми же значениями, что и в случае обычных ССС с однолучевым покрытием, как определено Статьей 21 Регламента радиосвязи. Ограничиваясь важным случаем оценки ЭМС СССМП с наземными РРЛ, можно утверждать, что ситуация не изменится существенно и даже улучшится в случае многопролетной наземной РРЛ, расположенной на территории нескольких лучей СССМП. Действительно, в этих лучах используются разные полосы частот, вследствие чего вероятность их совпадения уменьшится; такой же эффект создаст более узкая полоса частот, в которой работает каждый из лучей. Эти соображения касаются как линии вниз (спутник — приемник наземной станции), так и линии вверх. На линии вверх помеха от наземных станций уменьшится также из-за высокой избирательности узкого луча спутника и благодаря пространственному разносу других «одноцветных» лучей.

Особенности использования СССМП для передачи вещательных программ (в основном имеется в виду ТВ-вещание как самый важный вид вещательной информации и из-за специфических требований к звуковому вещанию в отношении приема на подвижные терминалы). Распространение непосредственного телевизионного вещания (НТВ) обычным для таких сетей способом, т.е. заранее сформированными пакетами ТВ-каналов, в многолучевой структуре не имеет смысла, так как придется передавать один и тот же набор пакетов в каждом луче, и реальная пропускная способность сети окажется равной пропускной способности одного луча, т.е. в m раз меньше, чем в СССМП для индивидуальных независимых сигналов связи и передачи данных, и в n раз меньше, чем в однолучевой сети. Несколько лучше может использоваться емкость СССМП для способа передачи VoD (видео по требованию), поскольку при этом возможны случаи передачи в разных лучах различной информации; однако, одновременно уменьшается число запросов, которые можно удовлетворить одним показом, что снижает экономическую эффективность метода. Энергетический выигрыш от применения МП (т.е. возможность создания той же спектральной плотности мощности при меньшей мощности передатчика) — сохраняется.

Однако все более популярным становится просмотр вещательных программ и отдельных передач по индивидуальному запросу в удобное абоненту время через сеть

Интернет, по технологии IPTV и OTT. В этом случае нагрузка лучей становится статистически независимой, и все ранее приведенные соображения, сделанные для каналов связи и передачи данных, будут справедливы и для передачи ТВ (которое, однако, при этом не вполне подпадает под принятое в МСЭ определение термина «вещание»).

Выводы. Приведенные в данной статье соображения позволяют утверждать, что построение сетей СС по многолучевому принципу позволяет получить существенное (многократное) увеличение их пропускной способности, а также уменьшить мощность передатчиков космической и земных станций и в некоторых случаях улучшить условия ЭМС с соседними сетями спутниковой связи. Поэтому в современных условиях переполнения ресурса уникальной геостационарной орбиты этот способ построения сетей СС представляется наиболее перспективным при создании новых сетей во всех выделенных для СС диапазонах частот.

Разумеется, создание многолучевого покрытия усложняет конструкцию спутника и увеличивает его стоимость, но указанные выше преимущества в отношении пропускной способности, необходимой мощности бортовых и наземных передатчиков, ЭМС позволяют создавать экономически эффективные ССС с высокой пропускной способностью. Такие сети могут быть реализованы в рамках ранее выделенного орбитально-частотного ресурса и тем самым способствовать решению проблемы перегрузки геостационарной орбиты. При этом следует учитывать рассмотренные в статье особенности СССМП.

Автор благодарит М.М. Симонова, И.С. Поволоцкого и Б.А. Локшина за ценные замечания, высказанные при обсуждении статьи.

ЛИТЕРАТУРА

1. **Кантор Л. Я., Тимофеев В. В.** Спутниковая связь и проблема геостационарной орбиты. М.: Радио и связь, 1988.
2. **Кантор Л. Я.** Расцвет и кризис спутниковой связи // *Электросвязь*.— 2007.— № 7.
3. **Кантор Л. Я.** Проблемы международной регистрации систем спутниковой связи как зеркала современных международных отношений // *Электросвязь*.— 2014.— № 1.
4. **Кантор Л. Я.** Анализ методов эффективного использования космического пространства в свете деятельности НИИР // *Труды НИИР*.— 2014.— № 3.
5. **Бутенко В. В., Желтоногов И. В., Кантор Л. Я.** Новые горизонты систем спутниковой связи в Ка-диапазоне // *Электросвязь*.— 2013.— № 1.
6. **Сигараджан Кумар.** Обзор изменений в спутниковых системах Ка-диапазоне и ключевых вопросах регулирования / Семинар МСЭ «Перспективы использования Ка-диапазона спутниковыми системами связи» (Алма-Ата, 2012).
7. Рекомендация МСЭ-Р S.1782.
8. Регламент радиосвязи. МСЭ, 2012
9. *Электромагнитная совместимость систем спутниковой связи.* Под ред. Л.Я. Кантора, В.В. Ноздрина. М., ФГУП НИИР. 2009.
10. Рекомендация МСЭ-Р S.1432.
11. Документ МСЭ 4A/17.
12. Рекомендация МСЭ S.672-4

Получено 20.03.15

УДК 621.396

ПРИМЕНЕНИЕ ЭКСПЕРТНО-КВАЛИМЕТРИЧЕСКОГО МЕТОДА ДЛЯ ОБОСНОВАНИЯ ВЫБОРА ЭФФЕКТИВНЫХ ИННОВАЦИЙ В СПУТНИКОВОЙ СВЯЗИ

А. С. Аджемов, ректор МТУСИ, д.т.н.; mtuci@mtuci.ru

Е. В. Буйдинов, заместитель генерального директора ГПКС по инновационному развитию; sco@rscs.ru

Д. В. Кузовков, доцент МТУСИ, к.э.н.; kuz_dim@mail.ru

Для обоснования инновационных решений и выбора эффективных инноваций в сфере спутниковой связи с использованием космических аппаратов на высокоэллиптической орбите (КА на ВЭО) использован экспертно-квалиметрический метод (ЭКМ), основанный на экспертном методе оценивания по балльному принципу параметров эффективности инноваций, квалиметрическом методе количественного ее измерения и последующем ранжировании инноваций по уровню эффективности. Прикладное применение ЭКМ в спутниковой связи предполагает адаптацию параметров модели комплексной оценки эффективности инноваций, обоснование значимости и интервалов изменения частных показателей эффективности инноваций спутниковой связи.

Ключевые слова: спутниковая связь, инновации, экспертно-квалиметрический метод, экспертные оценки, квалиметрия, коэффициент эффективности инноваций, выбор, ранжирование инноваций.

Введение. Инновационная стратегия развития компаний спутниковой связи предусматривает развитие технологической инфраструктуры спутниковой связи (СС), при-

менение различных орбит и группировок космических аппаратов, создание новых продуктов и услуг [4]. Поэтому в портфеле инноваций в спутниковой связи находятся как единичные, так и группы инноваций, различающиеся по моделям бизнеса и продвижения на рынок, по типам пользователей и территории охвата сетями СС.

Разнообразие инноваций в системах спутниковой связи с использованием космических аппаратов на высокоэллиптической орбите (СС ВЭО) диктует необходимость не только выбора наиболее эффективных инноваций с точки зрения компаний-операторов спутниковой связи и потребителей услуг, но и их группировки (дифференциации) на основные кластеры по видам услуг, потребительским качествам и сегментам рынка. Кластеризация инноваций в сфере систем СС ВЭО необходима для учета разнообразных аспектов проявления эффектов и сложностей реализации инноваций, что должно быть учтено при разработке параметров модели комплексной оценки эффективности инноваций (ЭИ), шкал оценивания при проведении экспертного опроса, а также для выявления по результатам отбора наи-