

ПОЛЯРИЗАЦИОННОЕ УПЛОТНЕНИЕ – ПЕРСПЕКТИВЫ ВНЕДРЕНИЯ

Использование поляризационного разделения сигналов в системах спутниковой связи России

В. БОБКОВ
М. ЕФИМОВ
А. КИСЕЛЕВ

С самого начала создания систем спутниковой связи и вещания (СССВ) все связные спутники (точнее, ретрансляторы) строились по стандартной схеме – прямая ретрансляция сигналов без обработки на борту, с линейной или круговой поляризацией радиосигнала. Для разделения сигналов использовалось только частотное и временное разделение.

Однако в сложных современных условиях размещения новых космических аппаратов (КА) на геостационарной орбите (ГСО) в некоторых СССР практикуется повторное использование имеющейся полосы частот [1]. Оно обеспечивается следующими взаимно совместимыми процедурами:

- пространственный разнос лучей КА: работа ведется в одних и тех же полосах частот при использовании спутниковых антенн, имеющих направленные и разнесенные в пространстве лучи;
- развязка по поляризации: передача осуществляется в одних и тех же полосах частот через спутниковые антенны с ортогональными поляризациями;
- применение кодового разделения сигналов.

Наиболее распространен смешанный способ, включающий пространственное и поляризационное разделение, который позволяет реализовать четырехкратное использование частот. Например, достаточно давно, еще с КА Intelsat-V, применяется поляризационная развязка в С-диапазоне в радиолиниях с круговой поляризацией [2].

Однако из-за ряда научно-технических трудностей такие системы не нашли широкого применения. Прежде всего, это относится к сетям типа VSAT – в мире нет ни одной системы VSAT, совмещающих работу в С-диапазоне, круговую поляризацию и повторное использование частот только за счет поляризационной развязки.

Как известно, определяющим фактором при повторном использовании частот КА с поляризационной развязкой в одной зоне обслуживания на поверхности Земли является уровень поляризационной развязки сигналов в «смежных» стволах ретранслятора, т. е. в стволах с одинаковым частотным диапазоном.

Требуемый уровень развязки уже обсуждался в печати [4], напомним лишь, что он составляет не менее 30 дБ.

Основные трудности при реализации в спутниковой радиолинии поляризационной развязки следующие:

- многократное использование частот при поляризационном разделении сигналов выдвигает соответствующие требования к кросс-поляризационным характеристикам антенн, образующих радиолинии Земля – КА (линия «вверх») и КА – Земля (линия «вниз»). При принятой для большинства систем спутниковой связи и вещания (СССВ) России в С-диапазоне (6/4 ГГц) круговой поляризации на радиолиниях кросс-поляризационные характеристики определяются в основном коэффициентом эллиптичности K_3 передающей и приемной антенн, образующих эти радиолинии, т. е. K_3 антенн КА и земных станций (ЗС). Существующие антенны ЗС, особенно диаметром до 5 м, имеют довольно широкий разброс значений K_3 (от 0,7 до 0,85), однако это намного ниже значений, требуемых для нормальной работы;
- в процессе работы возникают сложности из-за ухудшения качества сигнала вследствие деполяризации, обусловленной метеорологическими факторами. Поэтому станции приходится оснащать устройствами поляризационной компенсации [1], однако их использование сдерживается сложностью и дороговизной реализации.

Первая попытка развертывания подобной системы была предпринята ОАО «Газком» после запуска в 1999 г. КА «Ямал-100» [3]. В рамках действующей СССР «Ямал» разворачиваются различные сети с поляризационным разде-



лением, в том числе, по технологии VSAT. Таким образом, прецедент создания сетей VSAT только с поляризационным уплотнением уже есть.

Космический аппарат следующего поколения «Ямал-200» также выполнен с поляризационным разделением с целью двойного использования одного и того же частотного диапазона.

Оценим некоторые аспекты эксплуатации СССРВ с поляризационным разделением, прежде всего коэффициент реального использования частотного ресурса $K_{иср}$.

● Эксплуатация СССРВ с поляризационным разделением

Как уже отмечалось, систем, имеющих всю совокупность качеств СССРВ «Ямал», а именно – сетей типа VSAT в С-диапазоне с круговой поляризацией и уплотнением только за счет поляризационной развязки – пока не существует. Однако опыт эксплуатации сетей связи и ТВ в СССРВ «Ямал-100» показал принципиальную возможность реализации данного подхода и достижения определенных результатов, которые мы попытаемся оценить в данной работе.

Прежде всего, отметим несколько факторов:

- наличие большого парка действующих и выпускаемых «старых» (точнее, стандартных) антенн, которые нельзя исключить из системы, но которые не обеспечивают требуемой развязки;
- отсутствие в мире VSAT-антенн с требуемыми поляризационными характеристиками [4] ($K_э \geq 0,94$ во всем диапазоне частот с возможностью независимой подстройки $K_э$ и положения эллипса поляризации на прием и передачу);
- высокая стоимость антенн с $K_э \geq 0,94$ и отсутствие у них указанной подстройки.

● Антенны для ЗС

В настоящее время перечень имеющихся антенн отечественных производителей, в той или иной мере удовлетворяющих требованиям поляризационного разделения (например, для СССРВ «Ямал»), достаточно короток: 2,4, 3,7, 7,2 м ФГУП «НПО ПМ Развитие» для связи, 2,5 м «АвиаМАГ», 1,65, 2,0 м «АПЕКС» для приема ТВ и несимметричного Интернета.

При этом даже самые массовые в производстве антенны 2,4 м и 3,7 м ФГУП «НПО ПМ-Развитие», наиболее полно удовлетворяющие перечисленным требованиям, как по полосе частот, так и по $K_э$, имеют существенный недостаток – более высокую цену относительно стандартного оборудования.

Необходимых для построения масштабных сетей типа VSAT приемопередающих связных антенн класса 1,2, 1,5, 1,8, 2,0 м в настоящее время нет вообще. Действующие производители пока даже не берутся за изготовление АС с требованиями поляризационного разделения.

● Оценка окупаемости применения антенн с высокими значениями поляризационных характеристик

Расчет произведен для АС 2,4 м и типичного режима работы радиоканала со сверточным кодированием и коэффициентом кодирования 7/8 и модуляции QPSK,

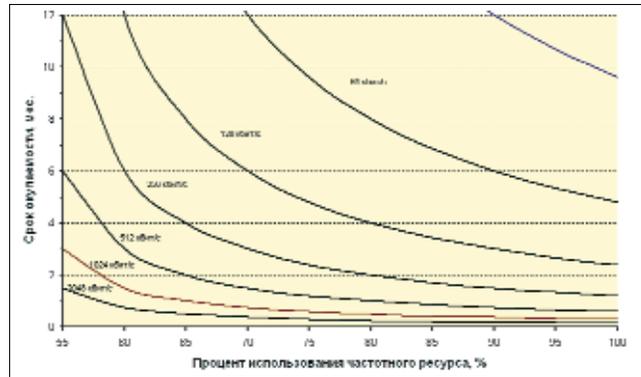


Рис. 1. Окупаемость применения АС 2,4 м (с различными $K_э$) за счет использования поляризационного уплотнения для разных скоростей передачи (7/8, QPSK)

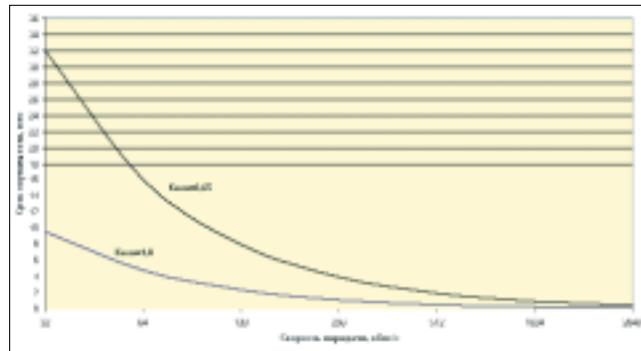


Рис. 2. Окупаемость применения антенн для разных значений коэффициента использования $K_{исп}$

для различных скоростей передачи информации от 32 до 2048 Кбит/с (рис. 1). Даже за счет 100%-ного использования частотного ресурса для канала со скоростью 32 Кбит/с увеличение стоимости антенны окупается примерно за 10 месяцев, а для канала 512 Кбит/с – за месяц. Представленный график (см. рис. 1) также позволяет определить срок окупаемости применения антенн при неполном использовании частотного ресурса (если антенны имеют высокие технические характеристики по $K_э$, но не соответствуют требованиям [4] для работы в СССРВ с поляризационной развязкой).

На рис. 2 приведены графики сроков окупаемости антенн различного качества по $K_э$, обеспечивающих $K_{исп} = 1$ и $K_{исп} = 0,65$ (1 – применение антенн позволяет использовать двойной частотный ресурс на 100%; 0,65 – на 65% соответственно).

● Экономический аспект проблемы в целом

Причины возникновения проблемы следующие:

- на КА устанавливается двойной комплект дорогостоящей приемопередающей бортовой аппаратуры, эквивалентный обычным двум стволам РТР (например, КА «Экспресс») и включающий МШУ, преобразователи частоты,

выходные усилители, резервные комплекты, матрицы переключения, волноводные мультиплексоры, делители, сумматоры, приемные и передающие антенны на две поляризации и т. д.;

- земные станции, работающие в такой системе, как минимум должны оснащаться антенной с хорошими поляризационными характеристиками. Такая антенна дороже типовой от 10 до 40%, в зависимости от диаметра и полосы рабочих частот, что практически незаметно при стоимости ЗС более 200 тыс. долл., но при стоимости ЗС около 50-70 тыс. долл. становится существенным фактором, а для ЗС типа VSAT (5-25 тыс. долл.) – неприемлемым для потребителя.

Если первый вопрос разработчик системы решает самостоятельно, то второй непосредственно касается пользователя системы (арендатора частотного ресурса). В этих условиях попытка привлечь заказчика использовать КА с поляризационным уплотнением (арендовать частотно-энергетический ресурс) вынуждает последнего:

- использовать в своей сети более дорогие антенные системы и, следовательно, ЗС в целом;
- ликвидировать старый парк своих антенн на всей сети из-за отсутствия преемственности.

Однако у заказчиков обычно формируются собственная «кооперация» и свои ЗС, поэтому добиться этого удается далеко не всегда.

Соответствующие оценки (приводятся ниже) показывают, что может быть достигнуто увеличение использования частот максимум в 1,3 раза, т. е. налицо противоречивая ситуация, когда имеющийся частотно-энергетический ресурс РТР используется не полностью.

Отметим, что в действующих традиционных системах (без поляризационного уплотнения) исключаются все перечисленные дополнительные затраты и проблемы, хотя сдаваемый в аренду частотный ресурс в 2 раза меньше.

Оценка рентабельности конкретных СССРВ с поляризационным уплотнением сигналов, несмотря на объективную необходимость этого разделения, требует тщательного учета всех технических, экономических и временных факторов. Учитывая неизбежность коренной реконструкции (замены антенн) всех ЗС существующих спутниковых сетей (что, в отличие от запуска соответствующего КА, не может быть выполнено как

ОЦЕНКА ДОСТИЖИМОГО КОЭФФИЦИЕНТА ИСПОЛЬЗОВАНИЯ ЧАСТОТ НА ПРИМЕРЕ СИСТЕМ «ЯМАЛ-100» И «ЯМАЛ-200»

Предполагая использование на ЗС типа VSAT дуплексных потоков до 512 Кбит/с с полосой около 0,5 МГц, получаем, что для частотного ресурса с $K_{\text{ичр}} = 2$ (100%-ное использование в стволах с перекрытием по поляризации) необходимо иметь в сети 144 земные станции. У «Газкома» их сейчас более 150 [3]. Таким образом, в системе «Ямал-100» при использовании имеющегося парка антенн с $K_3 > 0,94$ (порядка 140 шт.) теоретически может быть достигнут $K_{\text{ичр}} = 2$ в совмещенной полосе частот. Учитывая принцип преемственности, в качестве исходных данных допустим, что количество ЗС с антеннами с $K_3 > 0,94$ составляет порядка 200 (полагая естественное расширение сети на 50 станций), а средняя скорость на каждую из них – 512 Кбит/с (что реально для сетей типа VSAT). Занимаемая полоса со 100%-ным использованием частот составит около 1,5 ствола. Также допустим, что для сетей ТВ/РВ и широкополосного доступа в Интернет, где требования к K_3 антенн могут быть снижены за счет широкополосности используемых сигналов, исходя из общего потребного количества ТВ каналов [6], может быть использовано до 4 стволов РТР со 100%-ным использованием частотного ресурса. В зависимости от числа используемых по поляризации на 100% стволов $N + K_{\text{ичр}}$ можно определить выражением

Табл. 1. КА «Ямал-100» (несколько стволов с частичным перекрытием)

Характеристика ствола	10	Перекрыты по поляризации стволы	6 с частичным перекрытием
Полоса ствола, МГц	36		
Общая полоса частот, МГц	360	Общая полоса перекрытых по поляризации частот	Около 70 МГц

Табл. 2. КА «Ямал-200» №2 (все стволы перекрыты по поляризации на 100%)

Характеристика ствола	18	Перекрыты по поляризации стволы	18 с полным перекрытием
Полоса ствола, МГц	72		
Общая полоса частот, МГц	1296	Общая полоса перекрытых по поляризации частот, МГц	1296

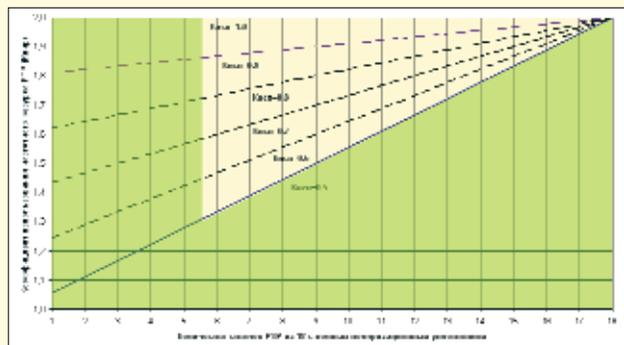


Рис. 3. Достижимый коэффициент использования частотного ресурса ($K_{\text{ичр}}$) для СССРВ «Ямал»

$$K_{\text{ичр}} = 2 \cdot \left[K_{\text{исп}} + \frac{N}{N+1} (1 - K_{\text{исп}}) \right], \quad (1)$$

где N – общее число стволов РТР; $K_{\text{исп}}$ – коэффициент использования ресурса в остальных стволах ($N-N+$) (со стандартным оборудованием). Например, $K_{\text{исп}} = 0,5$ для смежных стволов РТР, где развязка не может быть использована, $K_{\text{исп}} = 1$ для стволов со 100%-ной развязкой по поляризации (рис. 3).

В предположении, что кроме сетей ОАО «Газком» антенны с высокими поляризационными характеристиками по экономическим соображениям практически нигде не используются, очевидно, в стволах ($N-N+$) $K_{\text{исп}} = 0,5$.

Зеленым цветом на рис. 3 выделена область частотного ресурса КА «Ямал-200» для указанной выше возможной 100%-ной загрузки стволов (суммарно 5,5 ствола). Незакрашенная часть – ресурс, который не может быть использован из-за применения стандартного оборудования, не удовлетворяющего требованиям СССРВ с поляризационным уплотнением.

При принятых допущениях максимальный коэффициент использования частотного ресурса $K_{\text{ичр}}$ в системе «Ямал-200» на базе КА «Ямал-200» №2 составляет 1,3 (65% имеющегося ресурса).

разовая операция), обеспечение преемственности и непрерывности работы указанных сетей требует разработки стратегии подобного внедрения, учитывающей все три указанных фактора.

● **Возможные пути реализации поляризационного разделения**

Создание СССРВ – это не только (и не столько) разработка и запуск КА, сколько техническая политика, представляющая собой комплексное решение целого ряда технических, экономических и организационных задач, включающих в себя и космический (разработка и запуск КА, обеспечение его функционирования на орбите, контроль использования ресурса и т. д.), и наземный (разработка структуры и оборудования ЗС, обеспечение преемственности, рентабельности и т. д.) сегменты;

- основным направлением технической политики является минимизация затрат, т. е. обеспечение преемственности оборудования (соблюдение принципа последовательной постепенной модернизации [5]). Один из самых весомых факторов преемственности – предложение потребителю рациональных технических решений.

Реализация такой технической политики невозможна без соответствующей программы создания и развития СССРВ. Авторам не известна ни одна отечественная организация, которая бы имела такую программу. Более того, результаты ежегодных конференций, выставок и т. п. показывают, что процесс создания и развития СССРВ протекает стихийно, под влиянием сиюминутных факторов, что, естественно, сопровождается дополнительными финансовыми издержками. Однако несмотря на все трудности, разработка такой программы является весьма актуальной задачей. Особенно там, где вводятся новые факторы разделения сигналов и требуется замена оборудования (антенн), составляющего существенную часть стоимости ЗС и СССРВ в целом.

● **Выводы**

Проведенная оценка систем с поляризационным уплотнением показывает, что при использовании существующего оборудования частотно-энергетический ресурс КА может быть потенциально реализован в настоящее время не полностью, т.е. часть ресурса будет недоиспользоваться.

Использование потенциальных преимуществ СССРВ с поляризационным разделением требует формирования целенаправленной политики, разработки и систематической коррекции комплексной программы создания и развития СССРВ. ◀

ЛИТЕРАТУРА

1. Satellite Communications Fixed – satellite service // International Radio Consultative Commitee, International Telecommunication Union. – Geneva, 1988.
2. Freeman, Roger L. Reference manual for telecommunications engineering / Roger L. Freeman. – 2nd ed. p. cm.
3. www.gascom.ru
4. Бобков В. Ю., Ефимов М. В., Киселев А. М., Нагорнов В. И. Оценка требований по кросс-поляризационным характеристикам антенн земных станций спутниковой связи // Connect. 2004. №2. С. 50-54.
5. Уоллер Л. Проблемы военного ведомства США в области систем боевого управления, контроля, связи и разведки (СЗ) и пути их решения // Электроника. 1983. №25/26. С. 50-66.
6. «Города Солнца» информационной эпохи: Заметки с CSTB-2004 // Информ. курьер связь. 2004. №3. С. 4-5.