

И. В. Крючков, А. А. Филатов

СИНХРОНИЗАЦИЯ ПОДВИЖНЫХ МОДУЛЕЙ РАСПРЕДЕЛЕННЫХ РАДИОЛОКАЦИОННЫХ КОМПЛЕКСОВ

Рассмотрена система синхронизации малобазовых пространственно-когерентных распределенных радиолокационных комплексов. Проведен анализ существующих на сегодняшний день методов синхронизации пространственно-распределенных систем. Сформулированы требования к точности синхронизации распределенных РЛС метрового и дециметрового диапазонов. Исследована стабильность опорных генераторов макета распределенной РЛС. Даны оценки точности временной привязки по эфиру в условиях многолучевого распространения радиоволн.

E-mail: andrey-rus-sky@yandex.ru

Ключевые слова: многопозиционная РЛС, многолучевое распространение радиоволн, позиционирование, временная синхронизация, фазовая привязка.

Один из подходов к проектированию современных радиолокационных систем заключается в создании многопозиционных (МП) РЛС с кооперативным приемом и последующей совместной когерентной обработкой радиолокационной информации. Наибольшей информативностью в системах данного класса обладают пространственно-когерентные (ПК) МП РЛС с кооперативным приемом. Малобазовые МП РЛС состоят из совокупности приемных, передающих или приемопередающих модулей (ППМ), разнос в пространстве которых существенно больше размеров апертур антенн традиционных радиолокаторов, и центрального пункта обработки (ЦПО), из которого по специальным каналам связи (КС) осуществляется управление системой в целом.

Пространственно-когерентные МП РЛС сохраняют работоспособность даже при потере нескольких позиций, что позволяет считать их «живучими». Это накладывает требования к минимизации стоимости ППМ по сравнению с классическими однопозиционными РЛС.

Несмотря на указанные преимущества ПК МП РЛС, публикаций о полностью реализованных системах данного класса практически нет. Одними из наиболее сложных задач при построении ПК МП РЛС являются вопросы позиционирования, синхронизации по времени и высокочастотной (ВЧ) фазе — фазовой привязки (ФП).

Малобазовые МП РЛС целесообразно рассматривать в качестве сильно разреженных активных фазированных антенных решеток

(ФАР) со случайной конфигурацией. Они позволяют эффективно управлять положением фазового центра (ФЦ) решетки и пространственной концентрацией излучаемой энергии, что может делать систему скрытной. Наибольшей эффективностью системы данного класса обладают в низкочастотных диапазонах (50...800 МГц). При этом точность позиционирования ППМ должна составлять порядка $\lambda/10$, что требует формирования системной шкалы времени (ШВ) с наносекундной точностью, а ФП — со средним квадратическим отклонением (СКО) 30...40 град. на несущей частоте. Наибольший интервал времени когерентного накопления должен составлять несколько секунд [1].

Рассмотрим возможности удовлетворения указанных требований для пространственно-распределенных систем.

Задачи позиционирования и формирования точной ШВ можно решить с помощью спутниковых радионавигационных систем (СРНС). В них при использовании сигналов стандартной точности СКО измерения задержки на сегодняшний день составляет порядка 20...50 нс. При использовании дифференциальных методов измерения и длительном накоплении навигационных сигналов точность оценки ШВ может быть существенно выше — порядка 1...2 нс [2].

Способ синхронизации с помощью сигналов СРНС основан на одностороннем методе передачи, когда сигналы синхронизации (СС) распространяются по радиолинии «Космос — Земля». Однако более высокая точность достигается при использовании двусторонних методов.

В радиотелескопе VLA (США, 1980) для передачи СС использован закопанный в землю волновод с очень низким затуханием (1...2 дБ/км) на частотах 30...50 ГГц. При разнесении наиболее удаленных антенн 22 км точность поддержания фазового сдвига составляет 5 град на рабочей частоте 5 ГГц (соответствует временной точности 0,003 нс) при использовании двустороннего метода передачи [3].

В системе MMS (Кваджалейн, США) реализована временная синхронизация нескольких стационарных разнесенных позиций высокоточной многопозиционной измерительной РЛС с СКО $\pm 0,5$ нс. Синхронизация осуществляется методом двусторонней передачи посредством радиорелейных линий S-диапазона (4 ГГц) и наибольшим разномом позиций 40 км.

Следует отметить, что при синхронизации стационарных опорных генераторов (ОГ) для достижения наивысшей точности при передаче СС на расстояния до 1500 км следует использовать волоконно-оптические линии связи (ВОЛС) [4].

Принципиально новым подходом к построению МП РЛС является реализация так называемой «роевой» РЛС с размещением ППМ на

подвижных носителях. Конфигурация такой МП РЛС может быть адаптивной, что существенно повышает ее возможности. Поэтому в дальнейшем целесообразно рассматривать именно те методы позиционирования, синхронизации ШВ и ФП, которые не ограничивают свободы перемещения ППМ в пространстве.

В экспериментах по синхронизации разнесенных в пространстве ОГ по каналу связи земля — космос — земля методом двусторонней передачи, обозначаемым в иностранной литературе аббревиатурой TWSTFT (от англ. two way satellite time and frequency transfer), использовался узкополосный ствол геостационарного спутника Telestar 5. Сообщается о достижении точности синхронизации 2 пс по времени и 0,1 град по фазе несущей на частоте 300 МГц при времени накопления от 1 с и более. Эти результаты были получены при использовании качественного кварцевого генератора (кг) с долговременной относительной нестабильностью частоты 10^{-9} (за одни сутки). В данных экспериментах показано, что при времени накопления 500 с точность синхронизации системы может быть лучше, чем при использовании в качестве ОГ водородного мазера [5].

В отличие от приведенных выше примеров в системе синхронизации разнесенных позиций, предназначенной для астрономических наблюдений радиотелескопа LOFAR (от англ. Low Frequency Array; диапазон рабочих частот 10...250 МГц, база 400 км) использована ШВ системы GPS. В качестве задающего генератора применяется рубидиевый стандарт частоты с относительной нестабильностью 10^{-11} . Это позволяет «отслеживать» и усреднять суточные уходы ШВ в 10...20 нс. Результаты оценок показали, что на интервале около 70 ч СКО разности показаний временных шкал в разнесенных точках пространства составила около 2 нс. Результаты ФП не сообщаются [6].

В международном венецианском аэропорту Марко Поло прошла тестирование МП система контроля за воздушным движением (так называемая MLAT-система — от англ. Multilateration System). Она состоит из небольшого числа *недорогих* приемных элементов (до 20), регистрирующих сигналы от воздушных объектов в полосе 30 МГц на частоте 1 090 МГц в условиях аэропортовой застройки. Координаты приемников и ЦПО считаются известными. СКО измеренной задержки одним приемником мультilaterационной системы составляет доли наносекунд, а результирующая ошибка по совокупности приемных элементов — единицы наносекунд. Данные результаты получены без использования сигналов СРНС, а указанная точность соответствует погрешности позиционирования и не превышает нескольких метров. В рассматриваемой системе обеспечивается СКО определения координат на уровне 1 м. Такая точность получена при использовании обычных ОГ с относительной долговременной нестабильностью частоты $10^{-6} \dots 10^{-7}$ [7].

Сравнительная характеристика полученных на сегодняшний день результатов по обеспечению временной привязки представлена в таблице. Во всех рассмотренных системах основными составляющими ошибок оказывались погрешности калибровки инструментальных задержек.

Система (метод)	СКО, нс	Накопление, с	Метод передачи	Частота, МГц	Относительная нестабильность ОГ
VLA, США	0,003	—	Двусторонний	5000	—
MMS, США	0,5	—		4000	—
СРНС	10—50 1—2	От 10^3	Односторонний	~1200, ~1600	10^{-13} — 10^{-14}
TWSTFT	0,002—0,5	От 1	Двусторонний	300	10^{-9}
ВОЛС	0,1—0,2	—		10^8	10^{-9}
SATRE, Германия	0,03	До 10^5		20	10^{-9}
MLAT, Италия	2	—	Односторонний	1090	10^{-6} — 10^{-7}

Реализация этих, а также многих других проектов показывает, что задача синхронизации разнесенных в пространстве ОГ успешно решалась самыми разнообразными способами. При этом наивысшей точностью обладает двусторонний метод передачи СС. Использование односторонних методов для подвижных носителей приводит к большим ошибкам. В частности, позиционирование с помощью СРНС может иметь дополнительные недостатки. Доступ к навигационным сигналам в локальной области пространства может отсутствовать по ряду причин.

Следует отметить, что время накопления СС, а значит, и точность синхронизации определяется качеством ОГ. Использование в многоэлементных ПК МП РЛС ОГ с относительной нестабильностью частоты $10^{-11} \dots 10^{-14}$, позволяющих усреднять опорные колебания в течение нескольких часов и даже дней, на наш взгляд, нецелесообразно. Возможность накопления СС в течение нескольких секунд открывают недорогие серийно выпускаемые ОГ с долговременной

относительной нестабильностью $10^{-6} \dots 10^{-7}$. В дополнение к этому оптимальным решением в системе синхронизации ПК МП РЛС видится отказ от аппаратной реализации в пользу алгоритмических методов. Данные меры должны позволить эффективно решать задачи позиционирования, сведения ШВ и ФП, не прибегая к сложным и дорогим техническим решениям.

Для анализа возможности синхронизации ПК МП РЛС с указанными выше требованиями в НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана проводились исследования недорогих КГ, работающих в режиме свободных колебаний, при использовании специальных алгоритмов [8, 9] для оценки расхождения их полных фаз (рис. 1). На рисунке видно, что с помощью обычных КГ задача ФП с требуемой точностью может быть успешно решена при сличениях фазы с периодом не более 10 мс. При этом потенциальная точность оценки ШВ соответствует наносекундной точности (рис. 2).

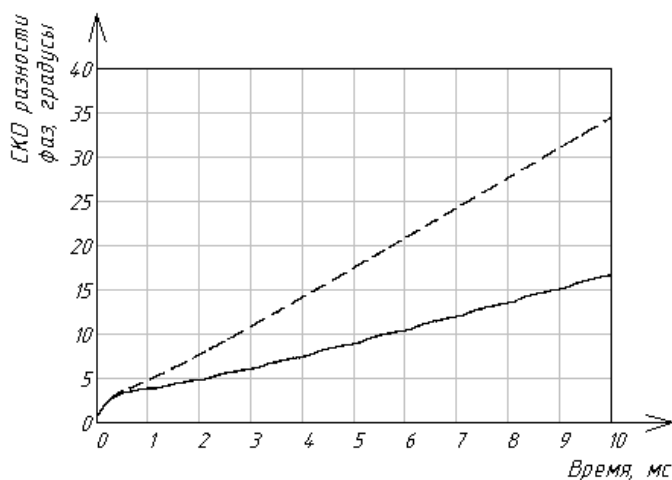


Рис. 1. Зависимость СКО фазы КГ на частоте 160 МГц от времени для разного времени наблюдения:

——— — 1 с; - - - - - — 2 с

Результат, представленный на рис. 2, соответствует аппроксимации ШВ, задаваемой КГ, полиномом первой степени. Разрешающая способность ШВ, формируемой КГ, составляет 10 нс. На рисунке видно, что линейная модель справедлива на интервалах времени 1...2 с. На более длительных интервалах для оценки требуется модель более высокого порядка.

Получение высокой точности синхронизации при передаче СС по узкополосному КС может иметь ряд сложностей и требует дополнительных инженерных решений. Поэтому возможность формирования ШВ и ФП с необходимой для ПК МП РЛС точностью при использо-

вании недорогих ОГ и ограниченный частотный ресурс эфирного КС позволяет предложить принцип разнесения синхронизаторов в пространстве (рис. 3).

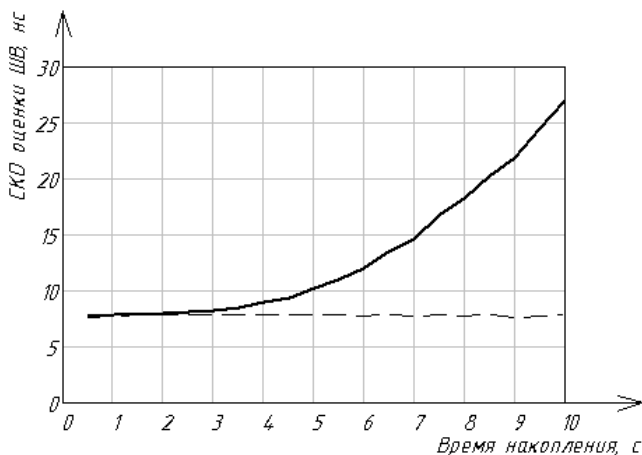


Рис. 2. СКД оценки ШВ алгоритмическими методами с помощью линейной (—) и параболической (----) моделях хода времени ОГ

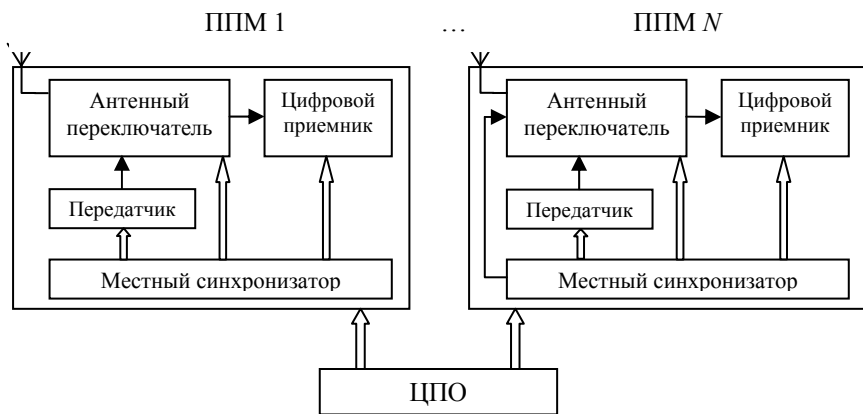


Рис. 3. Упрощенная структура ПК МП РЛС

Согласно структуре ПК МП РЛС, изображенной на рис. 3, каждый ППМ снабжается собственным синхронизатором, который выполняет те же функции, что и синхронизатор в когерентно-импульсной РЛС. Данная структура системы синхронизации позволяет не передавать большое число СС из ЦПО на N ППМ по эфирному КС. Важно отметить, что все местные синхронизаторы работают независимо и формируют N ШВ. Поэтому задача предлагаемой алгоритмической системы синхронизации заключается в сведении образованных таким образом ШВ к общей локальной ШВ.

Несмотря на принципиальную возможность формирования ШВ и ФП с необходимой для ПК МП РЛС точностью, использование эфирного КС создает дополнительные трудности, связанные с многолучевым распространением радиоволн. Влияние многолучевости на точность синхронизации подлежит дополнительному исследованию.

Невозможность обеспечения благоприятных условий распространения навигационных сигналов в локальной системе синхронизации и позиционирования, таких, как в СРНС, делает необходимым поиск других решений для достижения требуемой точности измерения координат на пересеченной местности. Проведенное в НИИ РЭТ МГТУ им. Н.Э. Баумана экспериментальное исследование влияния многолучевого распространения радиоволн на точность измерения координат убедительно свидетельствует о том, что сантиметровая точность позиционирования может быть достигнута при использовании сигналов с полосой от нескольких сотен мегагерц и более. Отметим, что при изменении полосы на порядок соответствующим образом — на порядок — изменяется точность оценки [10].

По оценкам авторов данной статьи, при распространении СС по эфиру в полосе 500 кГц при СКО оценки ШВ порядка 300 нс, ошибках, вызванных многолучевостью, порядка 30 нс результирующая погрешность оценки ШВ составит примерно 50 нс при времени накопления 1 с (рис. 4). Из рисунка 4 следует, что при увеличении бюджета погрешностей вследствие распространения СС по узкополосному эфирному КС наименьшая ошибка тактовой синхронизации достигается при увеличении времени накопления до нескольких секунд. Тем не менее, получение точности тактовой синхронизации порядка 50 нс даже при малом времени накопления (не более 1...2 с) видится вполне достижимым результатом.

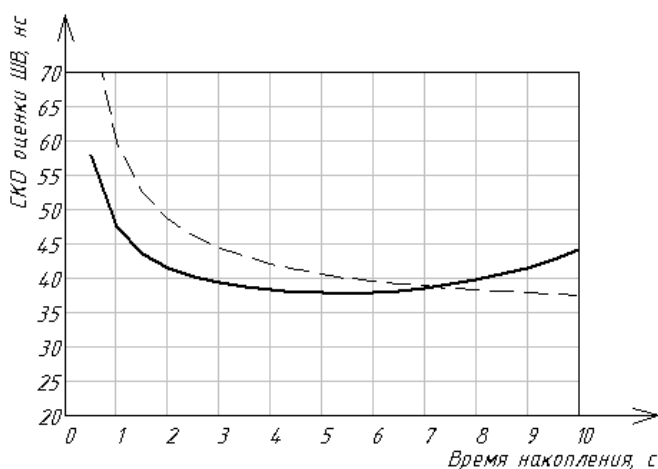


Рис. 4. Результирующее СКО оценки ШВ алгоритмическими методами при линейной (—) и параболической (----) моделях хода времени и эфирном распространении СС

В настоящее время готовится макет оборудования для экспериментального исследования точности позиционирования, оценки ШВ и ФП в условиях многолучевого распространения радиоволн и узкополосном КС между ЦПО и ППМ.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Возможности и особенности построения нового поколения информационных систем на основе принципов когерентной малобазовой радиолокации / И.Б. Федоров, И.В. Крючков и др. // Вестник МГТУ им. Н.Э. Баумана. Сер. Приборостроение. Спец. вып. – 2009. – С. 28–40.
2. Одуан К., Гино Б. Измерение времени. Основы GPS. – М.: Техносфера, 2002. – 399 с.
3. Напьер П. Дж., Томпсон А. Р., Экерс Р. Д. Большая антенная решетка: конструкция и характеристики современного радиотелескопа апертурного синтеза // ТИИЭР. – 1983. – Т. 71. – № 11. – С. 78–111.
4. Remote Atomic Clock Synchronization via Satellites and Optical Fibers / D. Piester, M. Rost, M. Fujieda et al. // Adv. Radio Sci. – 2011. – Vol. 9. – P. 1–7.
5. Bardin J., Weinreb S., Bargi D. Local oscillator distribution using a geostationary satellite // Experimental Astronomy. – 2004. – No. 17. – P. 193–199.
6. A. van Houwelingen G. S. Detailed description of clock and sync // LOFAR-ASTRON-RPT-057. – 2007 – 18 p.
7. New signal processing techniques in SSR-Mode S replies multilateration for A-SMGCS / G. Galati, M. Gasbarra, M. Leonardi, P. Magaro // International radar symposium. Warsaw, 2004.
8. Крючков И. В., Филатов А. А. Статистическая оценка шкал времени разнесенных элементов пространственно-распределенной радиотехнической системы // Радиолокация, навигация, связь: Тр. XVIII международной научно-технической конф. – Воронеж. – 2012. – Т. 3. – С. 1585–1590.
9. Крючков И. В., Филатов А. А. Оценка полной фазы гетеродина приемного тракта радиотехнического устройства с помощью следящего узкополосного измерителя // Радиолокация, навигация, связь: Тр. XVII международной научно-технической конф. – Воронеж. – 2012. – Т. 3. – С. 1590–1596.
10. Экспериментальное исследование влияния многолучевого распространения радиоволн на точность измерения дальности на пересеченной местности / А.А. Филатов и др. // Электронное научно-техническое издание «Наука и образование». – 2011. URL: <http://technomag.edu.ru/doc/255301.html> (дата обращения: 15.12.2011).

Статья поступила в редакцию 17.09.2012