<https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-25-30>
УДК 621.396.96

Вопросы прогнозирования дальности для устранения скоростной ошибки и результаты натурного эксперимента

С. Е. Фетисов, Ю. П. Волошин

Акционерное общество «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники», Москва, Российская Федерация

В радиолокаторах с линейно-частотной модуляцией зондирующего импульса скоростная ошибка измерения дальности может составлять существенную часть систематической ошибки. Скоростную ошибку можно устранить путем прогнозирования дальности. Применение этого подхода в радиолокаторах с аналоговой обработкой сигналов затруднялось отсутствием развитых вычислительных средств. В радиолокаторах с цифровой обработкой сигналов скоростную ошибку дальности нередко устраняют через оценку частоты Доплера. В статье рассматриваются вопросы устранения скоростной ошибки путем прогнозирования дальности без оценки частоты Доплера и приводится результат натурных испытаний данного метода в обзорном радиолокаторе.

Ключевые слова: измерение дальности, функция неопределенности ЛЧМ-импульса, скоростная ошибка дальности, прогноз дальности, поправка Клаудера и Рихачека

Для цитирования: Фетисов С. Е., Волошин Ю. П. Вопросы прогнозирования дальности для устранения скоростной ошибки и результаты натурного эксперимента // Вестник Концерна ВКО «Алмаз – Антей». 2021. № 3. С. 25–30. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-25-30>

For citation: Fetisov S. E., Voloshin Yu. P. Range prediction issues for doppler related range error elimination, experiment results // Vestnik Koncerna VKO "Almaz – Antey". 2021. No. 3. P. 25–30. <https://doi.org/10.38013/2542-0542-2021-3-25-30>

Поступила 09.06.2021 Отрецензирована 25.06.2021 Одобрена 07.07.2021 Опубликована 20.10.2021

Прогнозирование дальности

При наличии радиальной составляющей скорости движения цели v_r относительно радиолокационной станции (РЛС) наблюдается доплеровское смещение частоты принимаемого эхосигнала $F = -2v_r f_0 / c$, где f_0 – несущая частота, c – скорость света. Рассогласование по частоте F между характеристикой согласованного фильтра и принимаемым прямоугольным импульсом с линейной частотной модуляцией (ЛЧМ-импульсом) с длительностью τ_n и девиацией частоты Δ_f приводит к временному смещению максимума сжатого импульса на $\tau = -F\tau_n / \Delta_f$, что порождает скоростную ошибку измерения дальности [3, 4].

$$\Delta_r = c\tau/2 = v_r \tau_n f_0 / \Delta_f. \quad (1)$$

При движении цели с постоянной радиальной скоростью v_r за время Δ_t она пройдет путь $v_r \Delta_t$. Приравнявая путь к скоростной ошибке (1), получим время:

$$\Delta_t = \tau_n f_0 / \Delta_f, \quad (2)$$

за которое цель пройдет расстояние, равное скоростной ошибке дальности, чем и компенсирует эту ошибку. Время Δ_t не зависит от радиальной скорости цели и определяется только известными параметрами ЛЧМ-импульса.

В работе [1] указывается, что измеренная со скоростной ошибкой (1) дальность до цели будет соответствовать ее истинному местоположению через время Δ_t после момента отражения сигнала $t_{отр}$ в момент времени

$$t_d = t_{отр} + \Delta_t. \quad (3)$$

При равномерном движении цели и $\Delta_t > 0$ измеренное значение дальности будет

определять местоположение цели в момент времени t_d и является прогнозом [2], а при $\Delta_t < 0$ измеренное значение дальности является ретроспективным и относится к прошедшему моменту времени. Измерив после согласованной фильтрации момент приема импульса $t_{пр}$, который при движении цели смещен на время τ , и зная момент излучения $t_{изл}$, нетрудно показать, что момент измерения дальности без ошибки приходится на время

$$t_d = \frac{(t_{изл.} + t_{пр.})}{2} + \left(1 - \frac{v_r}{c}\right) \Delta_t. \quad (4)$$

В случае $v_r \ll c$ исключение из (4) слагаемого $\frac{v_r}{c} \Delta_t$ приводит к весьма незначительной ошибке t_d .

Если частота Доплера F много меньше девиации частоты Δ_f , расширением основного лепестка сжатого ЛЧМ-импульса можно пренебречь. В этом случае при равномерном движении цели оптимальная оценка дальности в прогнозный момент времени t_d в статистическом смысле не смещена относительно истинного положения цели и имеет минимально возможную дисперсию [9].

Исследования [1] и [9] показывают возможность устранения скоростной ошибки измерения дальности в РЛС с линейной частотной модуляцией зондирующего импульса без привлечения каких-либо априорных сведений о скорости движения цели и без измерения скорости средствами сигнальной либо траекторной обработки.

Для систем с выдачей потребителю измеренной дальности цели в режиме реального времени прогнозирование дальности сводится к задержке выдачи на время Δ_t . Для систем с упреждающим целеуказанием возможна выдача измеренной дальности без задержки в паре с определяемым РЛС временем упреждения Δ_t .

Вопросы применения прогноза дальности

В статье особое внимание уделяется измерению с прогнозированием дальности, которое имеет место при положительном изменении частоты ЛЧМ-импульса. Несмотря на достаточную теоретическую проработку

вопросов устранения скоростной ошибки [1–3, 9], в известных публикациях не встречаются сведения об использовании в существующих отечественных РЛС рассматриваемого метода прогнозирования дальности.

Прогнозирование дальности в РЛС с аналоговой обработкой сигналов затруднялось отсутствием необходимой элементной базы, позволяющей задерживать выдачу целеуказания на длительное время (линия задержки на сотни миллисекунд). Также применение ограничивалось наличием других, более значительных ошибок целеуказания, связанных с временной задержкой передачи донесений и с погрешностью нанесения информации на планшет воздушной обстановки.

Применение прогнозирования дальности стало доступным с развитием цифровой элементной базы. Однако в отечественной литературе последнего времени данному подходу не уделяется достаточного внимания. Современные публикации по теме устранения скоростной ошибки измерения дальности связаны с синтезом новых сигналов, которые менее чувствительны к доплеровскому смещению или с исследованием границ устойчивости алгоритмов траекторной обработки при наличии скоростной ошибки [5, 6].

Важно отметить, что в настоящее время прогнозирование дальности может использоваться как метод упреждения для систем ПВО и по ряду причин приобретает все большее практическое значение:

1. Необходимость наблюдения современными РЛС высокоскоростных гиперзвуковых и баллистических целей при использовании ЛЧМ-импульсов заставляет учитывать скоростную ошибку измерения дальности наиболее эффективным способом. В отличие от оценки дальности после компенсации скоростной ошибки с привлечением неточно измеренной радиальной скорости цели средствами цифровой либо траекторной обработки дисперсия прогнозной оценки дальности минимальна [9].

2. К современным РЛС обнаружения повышаются требования по точности измерения координат цели, которые могут

удовлетворяться за счет снижения систематической ошибки с использованием метода прогнозирования дальности.

3. Прогнозирование дальности способно обеспечить упреждающее целеуказание в момент наблюдения цели, что может быть важным для средств прямого поражения.

Следует отметить два ограничения, возникающие в ряде случаев при использовании прогноза дальности.

Первое ограничение связано с предельно допустимым ускорением при движении цели. Поскольку измеренное значение дальности применяется через фиксированное время Δ_r , при наличии радиального ускорения цели за Δ_r секунд накапливается путевая ошибка $a_r \cdot \Delta_r^2/2$, где a_r – радиальное ускорение. При существенных значениях Δ_r и a_r ошибка измерения дальности может достигать значительных величин. Данная ошибка может компенсироваться средствами траекторной обработки через фильтрацию второй производной дальности [7].

Второе ограничение связано с применяемыми после прогнозирования дальности методами траекторной обработки. Алгоритмы траекторной обработки трехкоординатных РЛС должны учитывать, что угловые координаты и прогноз дальности определяют пространственное местоположение цели в разные моменты времени. Такой учет затрудняется тем, что независимая фильтрация по траекторным признакам часто производится в прямоугольной системе координат, а параметры цели измеряются в сферической. Перевод из одной системы в другую при разномоментных значениях углов и дальности, строго говоря, не корректен. В ряде случаев ошибкой некорректного перевода можно пренебречь, применяя измеренные значения углов к прогнозному моменту времени. Такой подход дает малую угловую погрешность при значительном удалении цели. В этом случае максимальная ошибка измерения угла цели составляет $\approx \arctan\left(\frac{\Delta_t v_{\text{ц}}}{r_{\text{ц}}}\right)$ и наблюдается при ее движении по параметру со скоростью $v_{\text{ц}}$ на дальности $r_{\text{ц}}$.

В работе [5] указывается на возможность возникновения значительной ошибки прогноза

дальности в случае наблюдения групповой цели из-за существенного искажения главного лепестка автокорреляционной функции узкополосного ЛЧМ-сигнала. С учетом анализа [1] отражений от группы целей данное заключение стоит, вероятно, относить к другой известной проблеме – к совместному различению и оценке параметров интерферирующих сигналов [8].

Проведение исследований вызвано важностью изучения методов повышения точности существующих и перспективных РЛС путем устранения скоростной ошибки измерения дальности. Эффект от использования метода прогнозирования дальности для устранения скоростной ошибки исследовался при проведении натурных испытаний на образце РЛС кругового обзора.

Результаты натурных испытаний

В ходе натурных испытаний измерялись координаты самолета и регистрировались эталонные координаты с помощью бортового GPS-приемника. Преобразование эталонных координат точечной цели из геодезической системы в прямоугольную проводилось согласно ГОСТу Р 51794-2008 [4], после чего прямоугольные координаты использовались для расчета эталонной дальности с учетом точки стояния РЛС. Среднеквадратическое отклонение эталонных координат в прямоугольной системе при работе встроенного в бортовой GPS-приемник модуля калмановской фильтрации не превышало 10 м, что считалось достаточным для эталона.

Согласно эксперименту, на основном участке трассы самолет совершал полет с постоянной скоростью в направлении от РЛС, а после разворота – на РЛС. Радиальная скорость движения определялась как проекция вектора курсовой скорости на нормированный радиус-вектор траекторной точки в топосцентрической системе координат с началом в точке стояния РЛС. На рисунке 1 приводится график зависимости радиальной скорости движения самолета от времени.

Расчет разности между измеренной дальностью самолета и эталонной дальностью позволил сформировать графики мгновенных

Рис. 1. График радиальной скорости движения самолета

Рис. 2. Мгновенные ошибки измерения дальности без компенсации скоростной ошибки и с компенсацией через прогноз дальности при радиальной скорости движения цели от минус 250 до 280 м/с
— ошибки без компенсации ск. ошибки; — ошибки с компенсацией ск. ошибки; — радиальная скорость

ошибок для двух типов измерения: без компенсации скоростной ошибки измерения дальности и с компенсацией скоростной ошибки через поправку времени приема сигнала на Δ_r . Графики этих мгновенных ошибок представлены на рисунке 2. Дальность цели оценивалась методом максимального правдоподобия с использованием априорно известной формы сжатого ЛЧМ-сигнала исходя из предположения, что $F \ll \Delta_r$.

Как видно из графиков на рисунке 2, величины мгновенных ошибок измерения дальности без компенсации (светлые отметки на рисунке) в значительной степени зависят от скорости движения цели. В случае когда радиальная скорость движения самолета мало отличалась от нуля (1600 секунд на временной

шкале), ошибки измерения дальности были минимальны и незначительно отличались от ошибок прогноза дальности (темные отметки на рисунке).

Ступенчатый характер скоростных ошибок измеренной дальности на временном интервале 500–1000 и 2600–3300 секунд обусловлен изменением параметров зондирования для обеспечения необходимой зоны обзора (на разных углах места в процессе параллельно-последовательного обзора использовались сигналы разной длительности). Для компенсации скоростной ошибки дальности использовалась разная поправка Δ_r , которая в зависимости от параметров зондирующего импульса варьировалась в диапазоне от $\approx 0,1$ до $\approx 0,8$ секунды. Априорная информация о скорости движения

цели или результаты измерения скорости при этом не использовались. Отсутствие ступенек на графике мгновенных ошибок прогноза дальности говорит о правильности выбора временной поправки Δ_t согласно (2). На графике мгновенных ошибок прогноза дальности также не прослеживается зависимости от радиальной скорости движения самолета.

Взросшее СКО измерения дальности в правой части графика на рисунке 2 было вызвано снижением ОСШ после смены ракурса цели в средней точке временной шкалы.

Выводы

Проанализированы вопросы применимости прогнозирования дальности для устранения скоростной ошибки и возникающие при этом ограничения. Натурный эксперимент подтвердил возможность использования метода прогнозирования дальности для устранения скоростной ошибки, что согласуется с выводами теоретических исследований [1–3, 9]. Характер мгновенных ошибок измерения дальности, полученных в процессе проведения натурных испытаний, показывает практическое отсутствие зависимости между систематической ошибкой прогноза дальности и радиальной скоростью движения цели.

Список литературы

1. Klauder J. R., Price A. C., Darlington S., Albersheim W. J. The Theory and Design of Chirp Radars // Bell System Technical Journal. 1960. Vol. 39, no. 4.
2. Кук М. Б. Радиолокационные сигналы. М.: Советское радио, 1971. 568 с.
3. Теоретические основы радиолокации: учебное пособие для вузов. Под ред. Я. Д. Ширмана. М.: Советское радио, 1970. 560 с.
4. ГОСТ Р 51794-2008. Глобальные навигационные спутниковые системы. Системы координат. Методы преобразований координат определяемых точек.
5. Иванников А. П. Способ уменьшения влияния доплеровского смещения частоты в РЛС высокой мощности с частотной модуляцией // Радиотехнические и телекоммуникационные системы. 2015. № 4. С. 20–28.
6. Трофименко М. А., Фарбер В. Е. Оценка влияния наличия скоростной ошибки при измерениях дальности в РЛС с ЛЧМ-сигналом на границы устойчивости алгоритмов оценки дальности и радиальной скорости // Радиотехника. 2015. № 10. С. 7–16.
7. Fitzgerald R. J. Effects of Range-Doppler Coupling on Chirp Radar Tracking Accuracy // IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. 1974. Vol. AES-10, № 4. P. 528–532.
8. Трифонов А. П., Шинаков Ю. С. Совместное различение сигналов и оценка их параметров на фоне помех. М.: Радио и связь, 1986. 264 с.
9. Rihaczek A. W. Range Accuracy of Chirp Signals // Proceedings of the IEEE. 1965. Vol. 53, issue 4. P. 412–413.

Об авторах

Фетисов Сергей Евгеньевич – ведущий инженер-программист отдела 025 акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники», Москва, Российская Федерация
Область научных интересов: радиолокация, цифровая обработка сигналов.

Волошин Юрий Петрович – начальник сектора 444 отдела акционерного общества «Всероссийский научно-исследовательский институт радиотехники», Москва, Российская Федерация
Область научных интересов: радиолокация, цифровая обработка сигналов.

Range prediction issues for doppler related range error elimination, experiment results

Fetisov S. E., Voloshin Yu. P.

JSC All-Russian Scientific and Research Institute of Radio Engineering, Moscow, Russian Federation

Doppler related range measurement error (velocity error) can make a major contribution to the systematic error in radars with linear-frequency modulation of a probing pulse. The velocity error can be eliminated by range prediction. It was difficult to apply this approach to radars with analogue signal processing due to lack of advanced computer aids. In radars with digital signal processing, the velocity error in range measurements is often eliminated by estimating Doppler frequency. This paper covers issues related to the elimination of the velocity error by range prediction without Doppler frequency estimation and presents the experiment results at surveillance radar.

Keywords: Range measurement, LFM pulse ambiguity function, velocity error in range measurements, range prediction, Klauder – Rihaczek correction

Information about the authors

Fetisov Sergey Evgenievich – Lead Engineer, Department 025, JSC All-Russian Scientific and Research Institute of Radio Engineering, Moscow, Russian Federation

Science research interests: radio detection and ranging, digital signal processing.

Voloshin Yuriy Petrovich – Head of Department Section 444, JSC All-Russian Scientific and Research Institute of Radio Engineering, Moscow, Russian Federation

Science research interests: radio detection and ranging, digital signal processing.