

Миссия «Астероид» выполнима

В.Д. Захарченко, И.Г. Коваленко

Захарченко Владимир Дмитриевич,

доктор технических наук, профессор,

Волгоградский государственный университет

Коваленко Илья Геннадьевич

доктор физико-математических наук, профессор,

Волгоградский государственный университет.

Проект РФФИ № 16-12-20056

Можно ли обуздать летящие камни?

Какие средства нужны и насколько далеко мы зайдём?

(из канадского научно-популярного фильма "Mission Asteroid", 2013)

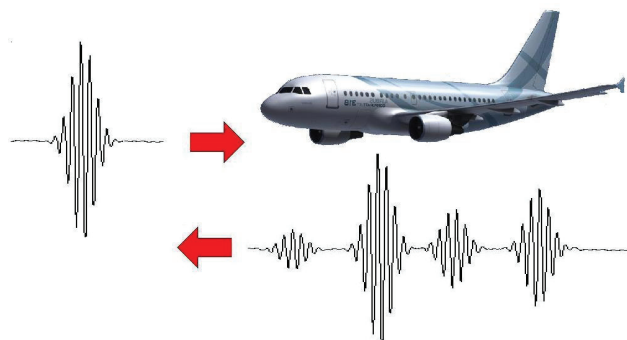
В ряде задач высокоточной локализации при обнаружении и распознавании целей (в радиолокации объекты наблюдения традиционно называют целями) необходимо иметь информацию об их размерах и скорости. Эти характеристики можно получить, измеряя радиолокационный портрет цели, который представляет собой сигнал, отраженный целью при условии «сверхразрешения», когда элемент разрешения радиолокационной системы (РЛС) по дальности ΔR значительно меньше линейных размеров цели [1, 2]. При этом полоса частот используемых сигналов определяется величиной элемента разрешения и

достигает значений 300–500 МГц, что соответствует элементу разрешения $\Delta R \sim 0.3\text{--}0.5$ м.

Индивидуальный характер радиолокационных портретов (РЛП) позволяет использовать их для решения задач распознавания объектов. Структура и длительность отраженного сигнала определяется количеством и расположением так называемых «блестящих точек» на объекте, отражающих сигнал в направлении его прихода [2]. Этих точек обычно немного, как правило, это участки поверхности двойной кривизны, их расположение индивидуально и определяется геометрией объекта (**рис. 1**).



Зондирующий сигнал



Отраженный сигнал

Рис. 1. Радиолокационный портрет объекта.

Стробоскопический метод преобразования широкополосных периодических сигналов

Исторически характерно опережающее развитие средств формирования коротких сигналов по сравнению со средствами их регистрации: вторые всегда отставали от первых на пути в область нано- и пикосекундной длительности. Стробоскопические методы спектральной трансформации позволяют согласовывать полосу сигналов наносекундной длительности с возможностями регистрирующей аппаратуры. При их использовании широкополосность устройств регистрации и обработки определяется не полосой тракта усиления, а возможностью формирования коротких стробирующих импульсов. Необходимую периодичность сигналов при этом в большинстве случаев несложно обеспечить.

Модель стробоскопического преобразователя состоит из стробоскопического смесителя (перемножитель) и фильтра, выделяющего низкочастотную часть спектра [3]. Принцип работы стробоскопического преобразователя иллюстрирует **рисунок 2**.

При этом величина коэффициента спектральной трансформации (растяжения сигнала) определяется отношением $N = T/\Delta T$, где $\Delta T = T_1 - T$ – так называемый «шаг считывания», T, T_1 – периоды повторения входного $x(t)$ и стробирующего $a(t)$ импульса, причем $\Delta T \ll T, T_1$. Последнее обстоятельство определяет высокий коэффициент спектральной трансформации N , который обычно составляет 10^4 – 10^6 . Поскольку формирование двух периодических сигналов с близкими частотами повторения представляет серьезную техническую проблему, период стробирования T_1 формируется из периода T специальной схе-

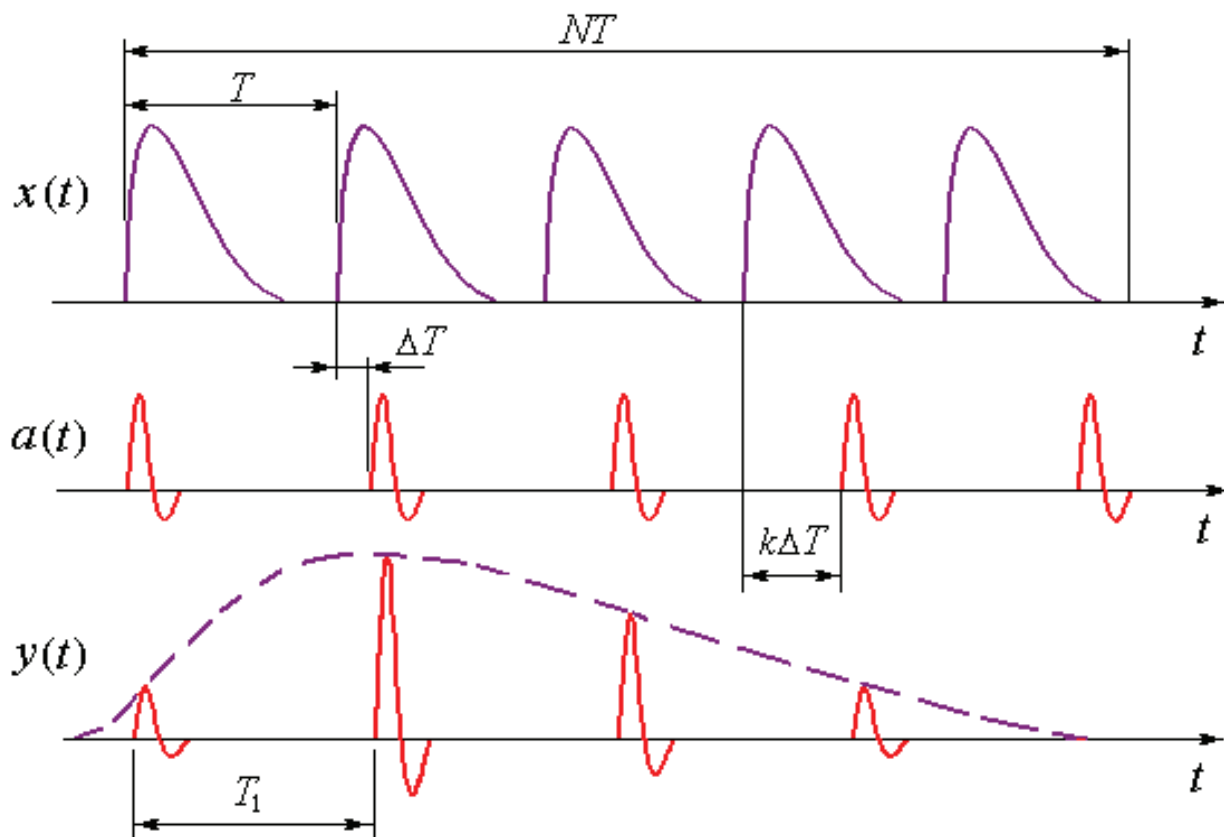


Рис. 2. Стробоскопическое преобразование периодических сигналов: NT – интервал наблюдения; k – номер периода.

мой автосдвига [4], как показано на **рисунке 3**. Аббревиатурами БПН и МПН на рисунке обозначены генераторы «быстрого» (БП) и «медленного» (МП) пилообразных напряжений.

При достаточно коротком стробирующем импульсе $a(t)$ выходной сигнал стробоскопического преобразователя адекватен входному $x(t)$, растянутому во времени в N раз: $y(t) \sim x(t/N)$.

Потенциальные возможности стробоскопической трансформации наиболее полно реализуются в осциллографической технике. На **рисунке 4** приведены параметры аналоговых и стробоскопических осциллографов некоторых отечественных и зарубежных фирм (Tektronix, Hewlett-Packard, Iwatsu). По осям отложены: Δf (МГц) – полоса пропускания; S (мм/В) – чувствительность по экрану.

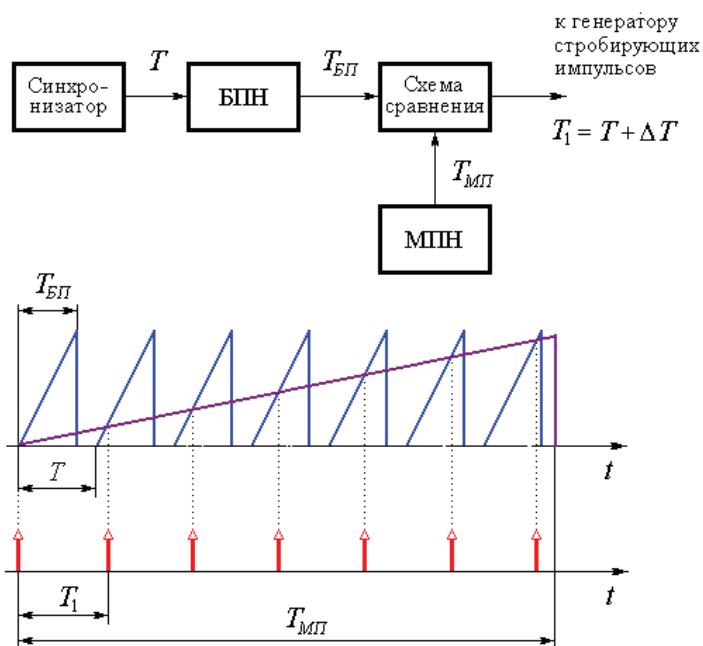


Рис. 3. Схема автосдвига стробоскопического преобразователя.

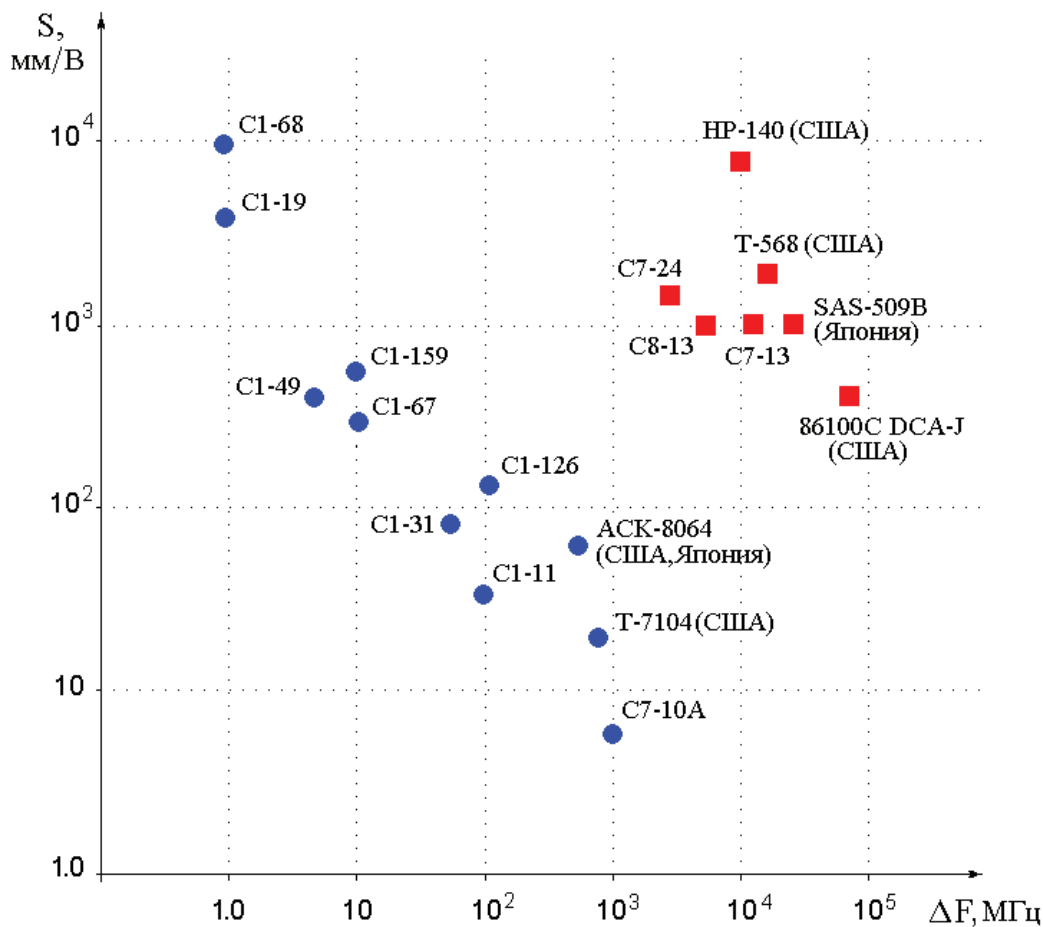


Рис. 4. Чувствительность и полоса рабочих частот некоторых осциллографических приборов.

● – аналоговые, ■ – стробоскопические.

Как видно из рисунка, соответствующее произведение $S\Delta f$ у стробоскопических приборов в $10^2 - 10^4$ раза выше, чем у аналоговых.

Стробоскопическая обработка радиосигналов. Схема радиоимпульсного стробирования

Задачи селекции целей по РЛП и скорости требуют широкой полосы зондирующих сигналов (сотни МГц), цифровая обработка которых вызывает серьезные технические трудности. Решением этой проблемы может служить стробоскопическая обработка периодической последовательности широкополосных радиосигналов.

Стробоскопическая трансформация временного масштаба огибающей периодических сигналов, полученных модуляцией высокочастотных колебаний СВЧ-генератора, производится в так называемой **схеме радиоимпульсного стробирования**,

где стробирующий сигнал представляет такую же последовательность коротких радиоимпульсов с близкими частотами повторения и несущих (**рис. 5**). При достаточно короткой огибающей стробирующего радиоимпульса $a(t) = A_1(t) \cos[\omega_0 t + \theta(t)]$ выходной сигнал схемы радиоимпульсного стробирования адекватен входному с растянутой во времени в N раз огибающей на разностной частоте несущих $\Omega = \omega_0 - \omega_1$ [5,6]:

$$y(t) \sim A_0 \left(\frac{t}{N} \right) \cos \left[\Omega t + \theta \left(\frac{t}{N} \right) \right]. \quad (1)$$

Схема сочетает принцип работы супергетеродинного приемника (преобразование на разностную частоту несущих) и стробоскопического преобразователя, причем трансформации временного масштаба подвергается только огибающая наносекундных радиоимпульсов. Последнее обстоятельство является важным, поскольку доплеровские сдвиги несущей частоты, полученные за счет движения объ-

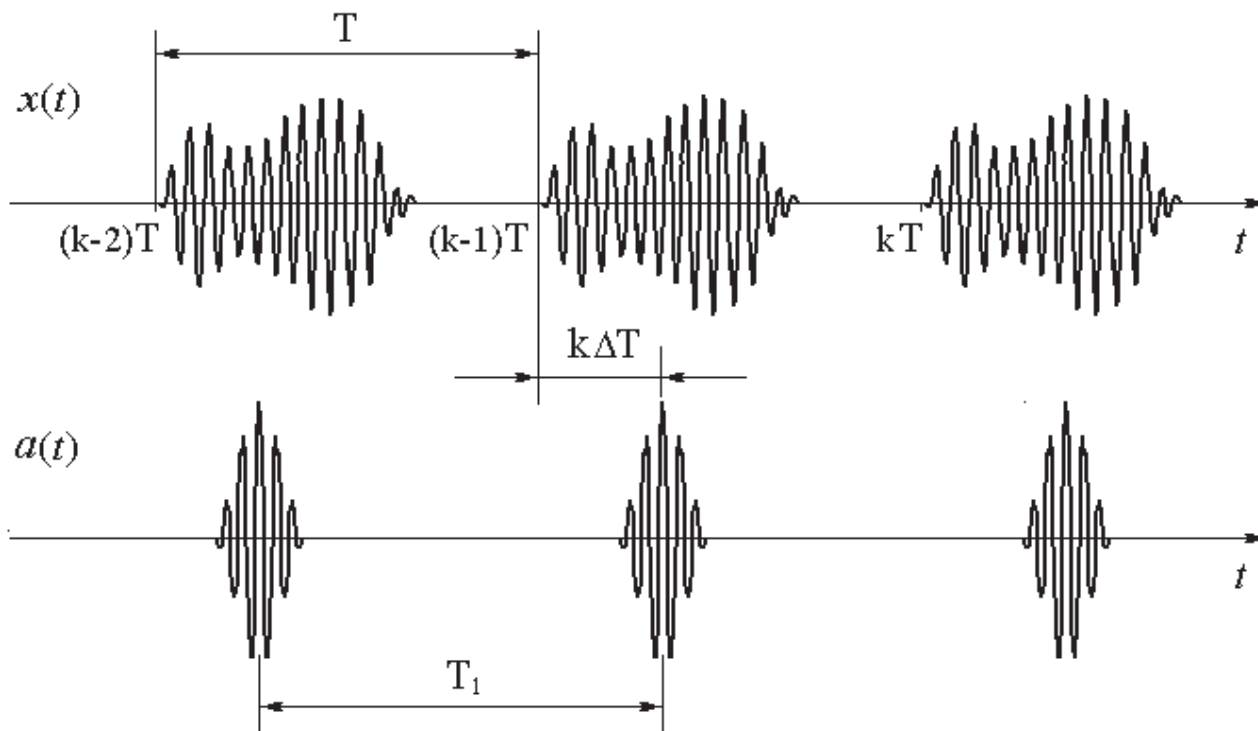


Рис. 5. Входной $x(t)$ и стробирующий $a(t)$ сигналы в схеме радиоимпульсного стробирования.

екта, полностью переносятся на промежуточную (разностную) частоту и трансформации не подвергаются. Это дает возможность наряду с измерением РЛП производить эффективную селекцию по скорости [7]. Периодический характер сигнала, необходимый для работы схемы, естественным образом реализуется в РЛС.

Наиболее эффективно использование стробоскопических систем при локации относительно малоподвижных объектов на малых дальностях [8, 9]. Такими объектами могут быть наземные и надводные цели, скопления автомашин на дорогах и др. Так, например, стробоскопическая РЛС с тактовой частотой $F_{\Pi} \sim 10\text{--}15$ кГц может обеспечить обзор участка дальности $\Delta R \approx 5$ км за время $t_{\Delta} = 0.5$ с при $\delta R = 5$ м. За это время с выхода системы поступает информация о 10^3 элементах дальности при усреднении каждого значения по 5 отсчетам. Скорость обзора по дальности в этом случае составляет $V_0^* \approx 0.01$ м/мкс; коэффициент трансформации временного масштаба $N = V_0 / V_0^* \approx 1.5 \cdot 10^4$. При этом ширина полосы частот выходного сигнала не превышает 3 кГц, что позволяет передавать информацию по телефонным каналам и эффективно использовать ЭВМ для вторичной обработки.

Следует отметить, что при стробоскопическом обзоре участка дальности требуемая стабильность цели (время, в течение которого характеристики отражения объекта можно считать неизменными) значительно меньше времени обзора t_{Δ} . Для нормальной работы стробоскопической системы это время определяет максимальный линейный размер объекта. В рассмотренном примере для объектов короче 50 м эта величина составляет всего 5 мкс.

Оценка размеров малых астероидов методом стробоскопической локации

Радиолокационные методы зондирования пассивных космических объектов (крупных метеоритов и астероидов) сигналами наносекундной длительности могут быть использованы при осуществлении обзора околоземного пространства с целью выделения космических объектов, представляющих опасность при столкновении с Землей.

Развитие методик, позволяющих повысить точность определения размеров астероидов (т.е. составляет ли их диаметр десятки или сотни метров), важно для корректной оценки степени ущерба, который они могут нанести планете (региональные или глобальные катастрофы соответственно).

Недостатком оптических способов определения линейных размеров небесных тел является то, что погрешность растет пропорционально расстоянию до измеряемого объекта. Дело в том, что оптические системы измерения являются угломерными, как следствие погрешность в определении угла приводит к погрешности оценки поперечных линейных размеров пропорционально расстоянию до исследуемого объекта. Кроме того, все оптические способы при наземном базировании подвержены зависимости от состояния оптической прозрачности и турбулентности в атмосфере. Этих недостатков лишены способы радиолокационного зондирования космического пространства, разрешение которых вдоль линии визирования определяется свойствами используемых сигналов и не зависит от расстояния до объекта.

Продольный размер астероида (10–100 м) определяется по длительно-

сти радиолокационного портрета с использованием сверхкоротких (~ 3 нс) зондирующих радиоимпульсов, обеспечивающих разрешение по дальности ~ 0.5 м. Эти сигналы позволяют получить РЛП, длительность которого определяется радиальным размером ΔR освещенной части объекта (рис. 6). В этой задаче также перспективны к использованию методы стробоскопической локации.

При значительной скорости небесных тел (30–40 км/с) смещение строба внутри периода зондирования может осуществляться за счет радиального перемещения объекта от периода к периоду, что позволит обойтись без используемой в осциллографической технике схемы автосдвига.

Известно, что характерной особенностью пассивных космических объектов является их вращение из-за отсутствия сопротивления воздуха. Поверхности объекта, отражающие

зондирующий сигнал в процессе радиолокации, меняют свое положение при вращении астероида. Измеряя длительность $\tau = 2\Delta R/c$ РЛП при различных ракурсах, возникающих при вращении, и усредняя результаты измерений, можно получить довольно точную оценку среднего радиуса объекта $\bar{r} = \langle \Delta R \rangle$ [10].

Так, например, для астероида диаметром ~ 50 м при периоде вращения ~ 30 мин разрешающая способность по дальности $\delta r \approx 0.5$ м может быть обеспечена зондирующим сигналом длительностью ~ 3 нс в диапазоне $f_0 \approx 10$ ГГц с полосой частот $\Delta f \approx 300$ МГц. При радиальной скорости астероида ~ 30 км/с доплеровская частота составит $F_0 = 2f_0 V_r/c \approx 2$ МГц. Отсутствие отражающих объектов на линии визирования позволяет выбрать частоту следования зондирующих импульсов ≈ 100 кГц (период сигнала ~ 10 мкс). Время измерения РЛП стробоскопи-

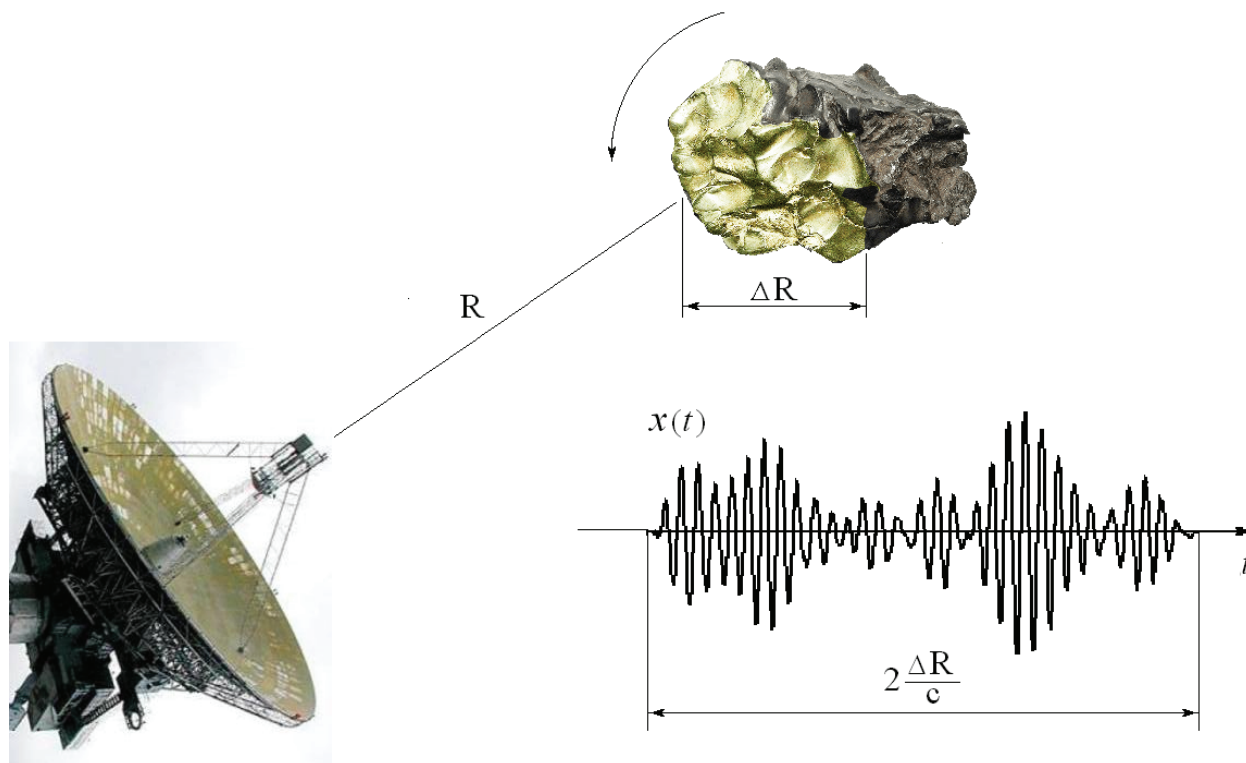


Рис. 6. Формирование радиолокационного портрета астероида

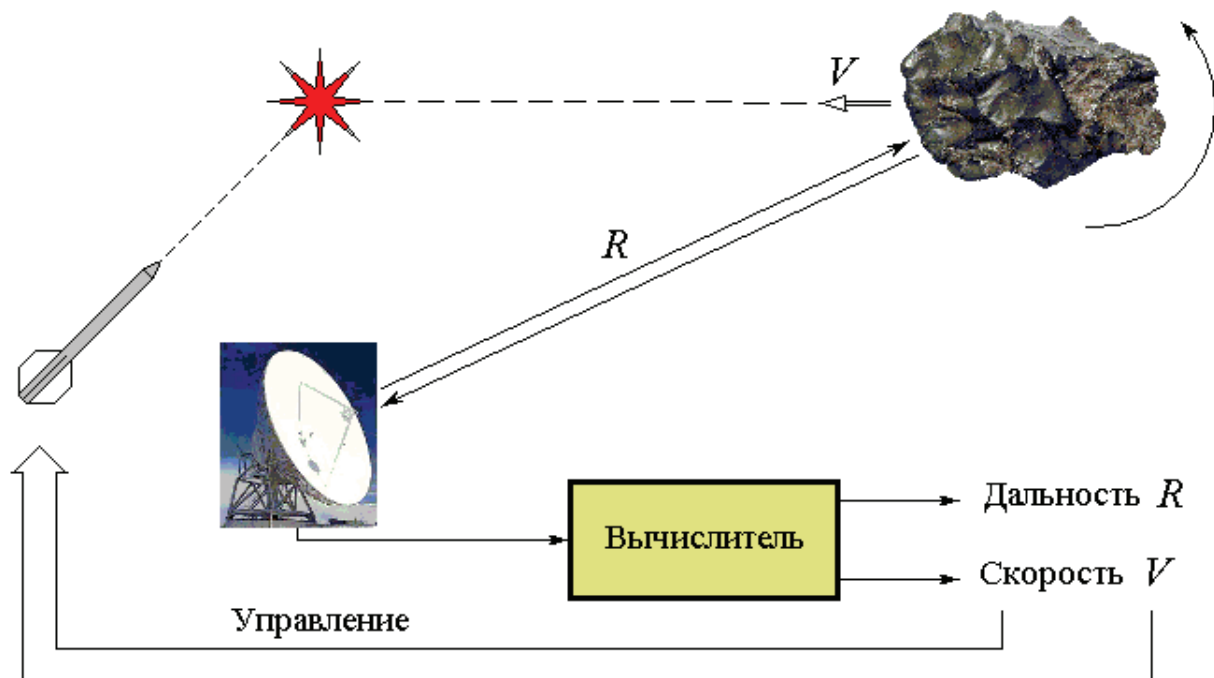


Рис. 7. Схема функционирования системы противодействия астероидно-кометной опасности.

ческим методом составит ~ 2 мс; шаг считывания $\Delta T \approx 1.3$ нс; коэффициент спектральной трансформации $N = c/2V_r \approx 5 \cdot 10^4$; полоса частот выходного сигнала – $\Delta F = \Delta f/N \approx 6$ кГц при несущей частоте F_0 .

Оценка скорости космических тел в реальном масштабе времени

Челбаркульский метеорит, взорвавшийся 15 февраля 2013 г. вблизи города Челябинск с более чем миллионным населением, подтвердил две универсальные истины: 1) астероидно-кометная опасность (АКО) является реальной, а не виртуальной, 2) входящие в атмосферу с большой скоростью малые космические тела могут быть не обнаружены вовремя на дальних подступах к Земле, так что у нас может не быть запаса времени на адекватное реагирование.

Таким образом, активно обсуждаемая в последние два десятилетия задача противостояния АКО требует

быстрого перехода в фазу практической реализации.

Защита планеты от метеоритной угрозы из космоса предполагает обнаружение опасных космических объектов, измерение параметров их движения, расчет траектории и их уничтожение, либо, по крайней мере, оперативное оповещение об опасности национальных служб по защите населения от чрезвычайных ситуаций на территории, подвергающейся угрозе.

При определении координат космического объекта необходим быстрый и точный прогноз его траектории для вычисления точки встречи средств поражения с объектом (рис. 7). Это особенно важно в ситуациях, когда скорость объекта поражения значительно превосходит скорость управляемых снарядов. Такой прогноз проводится по измерению скорости объекта на основе анализа доплеровского сдвига частоты отраженного радиолокационного сигнала. Повышение точности и оперативности измерения частоты до-

плеровского сигнала является необходимым условием эффективной работы радиолокационных систем космической защиты.

Точное определение средней частоты доплеровского сигнала необходимо также для расчета коэффициента спектральной трансформации РЛП астероида N (см. выше: $N = c/2V_r$), определяющего его размеры, поскольку в расчет входит скорость V_r .

В случае, когда различные точки объекта, формирующие отраженный сигнал, движутся с различными скоростями (например при вращении объекта) отраженный сигнал может иметь широкий спектр доплеровских частот. В этом случае в качестве доплеровской частоты в радиолокации используется центр тяжести энергетического спектра доплеровского сигнала – **средняя частота** ω_0 , которая остается устойчивой характеристикой, соответствующей движению центра масс движущегося объекта.

Однако для оценки параметров спектра доплеровского сигнала необходимо использование спектрального анализа, что не всегда отвечает опера-

тивным задачам, поскольку получение спектра $S(\omega)$ и его характеристик необходимо вести после того, как сигнал $x(t)$ уже получен, т.е. за пределами интервала наблюдения (**рис. 8**).

Получение быстрой оценки средней частоты требует максимальной скорости проведения вычислений в темпе поступления отсчетов сигнала. Непосредственный расчет энергетического спектра $E(\omega) = |S(\omega)|$ и его моментов аппаратно-программным методом с использованием алгоритмов дискретного преобразования Фурье (в том числе быстрого преобразования Фурье (БПФ)) налагает высокие требования к скорости и объему вычислений в частотной области, поскольку для получения спектральных оценок необходимо значительное время обработки по истечении интервала наблюдения, что по тактическим соображениям неприемлемо.

В работах [11, 12] было замечено, что положение центра тяжести спектра сигнала ω_0 может быть выражено альтернативно через производную Римана–Лиувилля [13, 14] полуцелого порядка $D_t^{1/2}$ от сигнала по формуле (2):

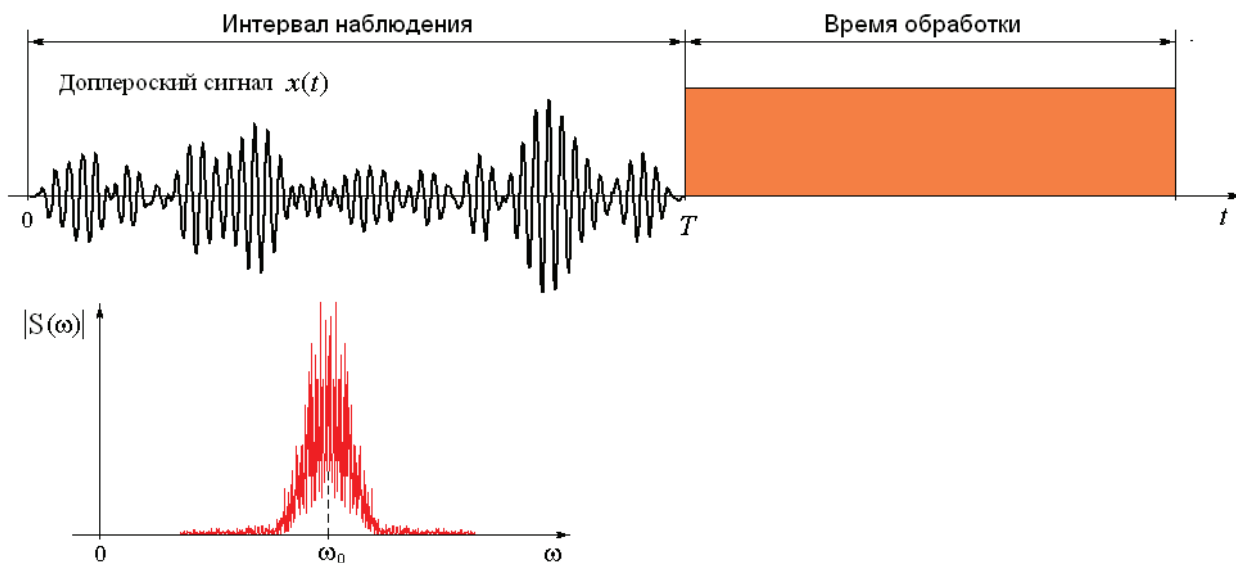


Рис. 8. Расчет средней частоты в спектральной области.

$$\omega_0 \equiv \frac{\int_0^{\infty} \omega E(\omega) d\omega}{\int_0^{\infty} E(\omega) d\omega} = \frac{\int_0^T |D_t^{1/2} x(t)|^2 dt}{\int_0^T x(t)^2 dt} \quad (2)$$

Дробную производную D_t^a произвольного порядка a от функции $x(t)$ можно представить как линейный интегральный оператор:

$$D_t^a x(t) = \int_{-\infty}^{\infty} x(t') h_a(t-t') dt' \quad (3)$$

Разностное ядро оператора $h_a t$ позволяет реализовать процедуру расчета уравнения (3) в виде фильтра, вычисляющего $D_t^{1/2} x(t)$ **без спектральной обработки** по мере прихода отраженного целью сигнала [12]. Это позволяет значительно сократить время обработки (**рис. 8**) после прихода сигнала, не теряя при этом точности.

Для космического объекта диаметром ~ 100 м при периоде вращения ~ 10 мин ширина спектра скоростей составит величину ~ 1 м/с, что соответствует ширине доплеровского спектра в 3 см диапазоне ~ 50 Гц. При этом средняя доплеровская частота при скорости 30 км/с составляет ~ 2 МГц; частота дискретизации сигнала в соответствии с теоремой Котельникова должна быть выбрана > 4 МГц ($\Delta T \approx 0.1$ мкс).

Для высокого разрешения по скорости (~ 0.01 м/с) необходимо измерять доплеровскую частоту с точностью ~ 0.5 Гц. При длительности доплеровского сигнала ~ 0.1 с это потребует обработки $N \approx 10^6$ отсчетов сигнала.

Расчет спектра и определения его центра тяжести с использованием быстрых алгоритмов (БПФ) потребует порядка $\sim 10^8$ операций умножения. Для процессора с производительностью в 1 Мфлопс это потребует вре-

мени ~ 20 с, в то время как оценка средней частоты в реальном масштабе времени с использованием дробного дифференцирования позволяет получить оценку скорости с той же точностью с задержкой по времени на величину ~ 10 мкс (для цифрового фильтра порядка $M=100$) по окончании интервала наблюдения.

Таким образом, выигрыш в быстродействии может составить более шести порядков. Временные затраты будут сопоставимы только при использовании алгоритма БПФ на процессорах производительностью в несколько Тфлопс, что соответствует производительности минисуперкомпьютеров [12].

Заключение

Использование метода стробоскопической локации позволяет получить РЛП малых астероидов в трансформированном масштабе времени. Это дает возможность оценить размеры пассивных космических объектов с точностью, не зависящей от дальности до объекта. При этом реализация указанного метода не требует специальной схемы автосдвига, используемой в стробоскопических осциллографах, так как смещение строба внутри периода осуществляется за счет учета эффекта Доплера для частоты повторения сигнала, чем в радиолокации обычно пренебрегают.

Применяемые в настоящее время в астрономии методы сводятся к определению поперечных размеров астероидов, в то время как предлагаемый подход позволяет определять продольные размеры; в этом смысле он дополняет традиционные методы.

Использование дробного дифференцирования доплеровского сигнала позво-

ляет получить точную оценку скорости большеразмерных космических объектов практически сразу после прихода отраженного сигнала. Предложенный алгоритм значительно проще и экономней классического, использующего спектральный анализ доплеровского сигнала.

Способы оценки среднего радиуса космических тел и оценки средней частоты доплеровских сигналов с использованием операций дробного дифференцирования защищены патентами Российской Федерации [11, 15].

Список литературы:

- 1. Е. Кенно, Д. Моффатт**
Аппроксимация переходных и импульсных переходных характеристик // ТИИЭР. 1965. Т.53, №8. С. 1025–1034.
- 2. Л.Ю. Астанин, А.А. Костылев**
Основы сверхширокополосных радиолокационных измерений. - М: Радио и связь, 1989. 192 с.
- 3. А.И. Найденов**
Трансформация спектра наносекундных импульсов. М.: Сов. радио, 1973. 180с.
- 4. Ю.А. Рябинин**
Стробоскопическое осциллографирование. М.: Сов. радио, 1972. 272с.
- 5. В.Д. Захарченко**
Вопросы теории стробоскопического преобразования узкополосных периодических сигналов // Изв. ВУЗов СССР. Приборостроение. 1976. №10. С. 5–8.
- 6. В.Д. Захарченко**
Обработка сложных радиосигналов стробоскопическими методами // АН СССР. Радиотехника и электроника. - 1980. №10. С. 2099–2104.
- 7. В.Д. Захарченко, О.В. Пак, В.И. Максименко, А.Ф. Васильев**
Формулировка принципа неопределенности при стробоскопической обработке сигналов // Известия ВУЗов России. Радиоэлектроника. 2012, №2. С. 43–46.
- 8. В.Д. Захарченко**
Стробоскопическая селекция широкополосных СВЧ-радиосигналов при когерентном зондировании // СВЧ-техника и телекоммуникационные технологии: Материалы 21-й Международной Крымской конференции (КрыМиКо-2011). Т.2. Севастополь: Вебер, 2011. С. 1124–1125.
- 9. В.Д. Захарченко, Е.В. Верстаков, О.М. Толика**
Радиолокационное наблюдение за протяжёнными объектами с использованием стробоскопической РЛС // Известия Волгоградского государственного технического университета. Электроника, измерительная техника, радиотехника и связь. № 10 (137). Вып.9. Волгоград: ВолгГТУ, 2014. С. 102–106.

- 10. V.D. Zakharchenko, I.G. Kovalenko, O.V. Pak**
Estimate of sizes of small asteroids (cosmic bodies) by the method of stroboscopic radiolocation // Acta Astronautica. 2015. V.108. P. 57–61.
- 11. В.Д. Захарченко**
Способ оценки средней частоты широкополосных доплеровских сигналов. Патент РФ № 2114440 от 27.06.98 // Изобретения. Заявки и патенты. 1998, № 18(III). С. 344.
- 12. V.D. Zakharchenko, I.G. Kovalenko**
On protecting the planet against cosmic attack: ultrafast real-time estimate of the asteroid's radial velocity // Acta Astronautica. 2014. V. 98C. P. 158–162.
- 13. С.Г. Самко, А.А. Килбас, О.И. Маричев**
Интегралы и производные дробного порядка и некоторые их приложения. Минск: Наука и техника, 1987. 688 с.
- 14. А.А. Потапов**
Фракталы, скейлинг и дробные операторы в радиотехнике и электронике // Журнал радиоэлектроники. 2010. № 1. С. 1–100.
- 15. В.Д. Захарченко, И.Г. Коваленко**
Способ предотвращения угрозы для планеты путем оценки размеров пассивных космических объектов. Патент на изобретение (РФ) №2527252 от 07.06.2013. Оpubл. 27.08.2014 // Изобретения. Полезные модели. 2014, №24.