УДК 531.383

Способ экспериментального определения масштабного коэффициента волнового твердотельного гироскопа с цифровым дифференцированием

А.А. Захаров

Аннотация

Опытный образец интегрирующего волнового твердотельного гироскопа с дифференцированием (ВТГ-ИГД) обнаружил следующую особенность изменения измеренных значений ($\Omega_{изм}$) задаваемой образцу постоянной угловой скорости Ω [рад/с]. Функция $\Omega_{изм}(t)$ содержит несинусоидальную периодическую составляющую, наибольшей первой гармонике которой соответствуют амплитуда $\Omega_{им1} \approx 0{,}0066\,\Omega$ и круговая частота $\omega \approx 1{,}09\,\Omega$. Анализом установлено, что особенность вызвана методической периодической ошибкой измерения угла ориентации стоячей волны в резонаторе. Используя эту особенность, разработан и опробован способ экспериментального определения масштабного коэффициента (K) ВТГ-ИГД. На данном образце измеренный коэффициент составил K=0.2773. Рассмотрены рекомендации по применению способов определения масштабного коэффициента ВТГ-ИГД.

Ключевые слова

способ, масштабный коэффициент, интегрирующий волновой твердотельный гироскоп, интегрирующий волновой твердотельный гироскоп с цифровым дифференцированием, дрейф, угол положения стоячей волны, угловая скорость.

1. Задача исследования

В последнее время для угловой ориентации движущихся объектов применяют измерительные устройства, называемые интегрирующими волновыми твердотельными гироскопами (ВТГ-ИГ) [1, 2]. Чувствительный элемент ВТГ-ИГ представляет собой упругую тонкую оболочку вращения – резонатор, предназначенный для поддержания в нем незатухающих механических колебаний оболочки в виде стоячей волны. На основании, под резонатором, установлены датчики углового положения волны. Сигналы датчиков усиливаются и складываются таким образом, что в результате образуются два выходных канала «As» и «Ac». Исходя из уровней сигналов по этим каналам, электронный вычислительный блок (ВБ) ВТГ-ИГ непрерывно подсчитывает значения угла (θ [рад]) положения стоячей волны (ориентации пучностей волны относительно основания). В устройстве функционируют встроенные системы управления (стабилизации амплитуды напряжения возбуждения колебаний, фазовой автоподстройки частоты колебаний, подавления квадратурной волны), которые не влияют на интегрирующие свойства ВТГ [3]. После подачи электропитания на измерительное устройство в резонаторе осуществляется режим позиционного возбуждения с образованием стоячей волны при $\theta=0$. Затем следует переключение в режим параметрического возбуждения, и с этого момента ВТГ-ИГ непрерывно выдает уже выходную информацию. Это последовательность измеренных значений угла (ψ [рад]) поворота гироскопа вокруг его оси чувствительности (оси резонатора) относительно инерциального пространства, подсчитанных ВБ в соответствии с известной [1-3] формулой $\psi = -\theta/K$, (1)

где K – масштабный коэффициент, причём положительное направление θ отсчитывается в направлении угла ψ.

Более совершенным, предназначенным для систем управления и навигации подвижных объектов, является интегрирующий волновой твердотельный гироскоп с дифференцированием (ВТГ-ИГД) [4]. Он отличается от ВТГ-ИГ выдачей дополнительной информации: последовательности измеренных значений проекции (Ω_a [рад/с]) абсолютной угловой скорости поворота гироскопа на его ось чувствительности. Расчет информации «Ω_a» осуществляется в блоке ВБ цифровым дифференцированием последовательности измеренных значений угла ψ по времени (t [с]).

Однако, при задании опытному образцу ВТГ-ИГД по оси резонатора угловой скорости (Ω_a) с постоянным значением Ω [рад/с] и измерении гироскопом этой скорости, выявилась следующая особенность изменения получившихся измеренных значений ($\Omega_{изм}$ [рад/с]) заданной скорости. Экспериментальная зависимость $\Omega_{изм}(t)$ (помимо ожидаемых составляющих – постоянной $\Omega_{и0}$ и шумовой) содержала также периодическую несинусоидальную составляющую (наибольшей первой гармонике которой соответствовали амплитуда $\Omega_{им1} \approx 0{,}0066\,\Omega$ [рад/с] и круговая частота $\omega \approx 1{,}09\,\Omega$ [рад/с]). Указанная особенность требовала объяснения. Кроме того, значение масштабного коэффициента в (1) точно не определено, что может вызвать ошибки в измерении угла ψ (и соответственно скорости Ω_a). Дело в том, что значение K для полусферических резонаторов (с практически используемой второй формой колебаний) из данных [3] составляет 0,281…0,312. Из расчетов [5-7] (при одинаковой толщине оболочки резонатора) K=0,277. В связи со значительным разбросом указанных данных, опытное определение уточненного значения K представляет собой актуальную научно-техническую задачу.

Таким образом, цель данного исследования – выяснение физической сущности периодического изменения значений $\Omega_{изм}$, присущего опытному образцу ВТГ-ИГД, и использование его для экспериментального определения уточненного значения масштабного коэффициента гироскопа.

2. Ход исследования

Для объяснения особенности полученных результатов, в ходе работы были проверены гипотезы наличия в эксперименте дрейфа известных моделей. Так в [3,8] дрейф, отвечающий четвертой гармонике изменения угла θ, обусловлен неустраненными дефектами разночастотности и (или) разнодбротности резонатора. В [9] дрейф, выраженный восьмой гармоникой изменения θ, вызван погрешностью алгоритма управления квадратурой при наличии дефектов разночастотности и (или) разнодбротности. Однако эти гипотезы отвергнуты, так как амплитуда дрейфа по указанной четвертой гармонике не зависит от $\dot{\theta}$ (или соответственно от Ω). А амплитуда восьмой гармоники должна уменьшаться с ростом $\dot{\theta}$ (или Ω). На экспериментальном же образце с ростом Ω амплитуды гармоник периодической составляющей $\Omega_{изм}(t)$ увеличивались пропорционально Ω.

В результате анализа установлено, что наиболее вероятной причиной появления указанной периодической составляющей функции $\Omega_{изм}(t)$ является возникновение методической ошибки измерения угла θ, так как в ВБ применяется алгоритм вычисления угла θ, использующий формулу

$$2\theta = \mathrm{arctg}(B) \qquad (2)$$

где B-отношение чисел, соответствующих сигналам выходов As, Ac и зависящих от θ.

Дело в том, что с изменением θ значения B теоретически достигают $\pm\infty$. Например, в [3,4,10] B = A_s / A_c, где A_s, A_c – демодулированные, относительно общей опоры, сигналы выходов As, Ac. Причем: $A_s = A \cdot \sin(2\theta)$, $A_c = A \cdot \cos(2\theta)$, A – медленная переменная величина, и значения B должны изменяться от $-\infty$ до $+\infty$. Поскольку число разрядов ВБ ограничено, то реальные подсчитываемые значения аргумента функции “arctg” при изменении угла θ также ограничены и не могут быть близкими к бесконечности. Следовательно, возникнет ошибка $\Delta\theta$ измерения угла θ. Причем при росте θ, в районах, где функция $tg(2\theta)$ претерпевает разрыв (то есть примерно при $2\theta = \pi/2 + n\pi$, или при $\theta = \pi/4 + n\pi/2$, где n = 0, ±1, ±2,…), эта ошибка меняет знак с минуса на плюс. Так что значения ошибки $\Delta\theta$ при увеличении угла θ повторяются через $\pi/2$, что соответствует четвертой гармонике изменения угла θ (или первой – изменения угла 4θ). Записываем $\Delta\theta$ в виде ряда Фурье с аргументом 4θ:

$$\Delta\theta = \Delta\theta_0 + \Delta\theta_{м1} \cdot \sin(4\theta + \varphi_1) + \Delta\theta_{м2} \cdot \sin(8\theta + \varphi_2) + \Delta\theta_{м3} \cdot \sin(12\theta + \varphi_3) + \ldots, \quad (3)$$

где: $\Delta\theta_0$ – постоянная составляющая; $\Delta\theta_{м1}, \Delta\theta_{м2}, \Delta\theta_{м3}, \ldots$, $\varphi_1, \varphi_2, \varphi_3, \ldots$ – амплитуды и начальные фазы гармонических составляющих ошибки $\Delta\theta$.

Соответственно измеренные значения ($\theta_{изм}$) угла θ равны:

$$\theta_{изм} = \theta + \Delta\theta.$$

Запишем $\theta_{изм}$ с учетом (3).

$$\theta_{изм} = \theta + \Delta\theta_0 + \Delta\theta_{м1} \cdot \sin(4\theta + \varphi_1) + \Delta\theta_{м2} \cdot \sin(8\theta + \varphi_2) + \Delta\theta_{м3} \cdot \sin(12\theta + \varphi_3) \ldots.$$

Для определения угла ψ блок ВБ (в соответствии с (1)) производит деление $\theta_{изм}$ на масштабный коэффициент. И измеренные значения ($\psi_{изм}$) угла ψ равны:

$$\psi_{изм} = -\frac{1}{K_{уст}} \cdot [\theta + \Delta\theta_0 + \Delta\theta_{м1} \cdot \sin(4\theta + \varphi_1) + \Delta\theta_{м2} \cdot \sin(8\theta + \varphi_2) + \Delta\theta_{м3} \cdot \sin(12\theta + \varphi_3) \ldots], \quad (4)$$

где: $K_{уст}$ – значение масштабного коэффициента уставки, занесенное в память ВБ,

$$K_{уст} = K + \Delta K;$$

ΔK – ошибка при записи масштабного коэффициента (из-за его неопределенности).

Пусть ВТГ-ИГД вращается вокруг оси резонатора с установившейся постоянной скоростью Ω, и угол θ изменяется по закону

$$\theta = \theta_0 + \Omega_\theta t,$$

где: Ω_θ – постоянная угловая скорость [рад/с] перемещения стоячей волны относительно основания; θ_0 – начальное значение [рад] угла θ.

Тогда, после подстановки в (4), следует

$$\psi_{изм}(t)=-\frac{1}{K_{уст}}\cdot[\theta_0+\Omega_\theta t+\Delta\theta_0+\Delta\theta_{м1}\cdot\sin(4\Omega_\theta t+4\theta_0+\varphi_1)+\Delta\theta_{м2}\cdot\sin(8\Omega_\theta t+8\theta_0+\varphi_2)+$$

$$+\Delta\theta_{м3}\cdot\sin(12\theta+12\theta_0+\varphi_3)\ldots]=-\frac{\Omega_\theta t+\theta_0+\Delta\theta_0}{K_{уст}}-\Delta\psi_{им1}\cdot\sin(4\Omega_\theta t+4\theta_0+\varphi_1)-$$

$$-\Delta\psi_{им2}\cdot\sin(8\Omega_\theta t+8\theta_0+\varphi_2)-\Delta\psi_{им3}\cdot\sin(12\Omega_\theta t+12\theta_0+\varphi_3)-\ldots, \qquad (5)$$

где $\Delta\psi_{им1}, \Delta\psi_{им2}, \Delta\psi_{им3}, \ldots$– амплитуды гармоник периодической составляющей функции $\psi_{изм}(t)$;

$$\Delta\psi_{им1}=\Delta\theta_{м1}\frac{1}{K_{уст}},\ \Delta\psi_{им2}=\Delta\theta_{м2}\frac{1}{K_{уст}},\ \Delta\psi_{им2}=\Delta\theta_{м2}\frac{1}{K_{уст}},\ \ldots \qquad (6)$$

Измеренные значения ($\Omega_{изм}$) скорости Ω определяются (как указано вначале) цифровым дифференцированием последовательности значений $\psi_{изм}$ по времени. Соответственно функцию $\Omega_{изм}(t)$ получим дифференцированием (5) по t:

$$\Omega_{изм}(t)=-\frac{\Omega_\theta}{K_{уст}}\cdot[1+4\Delta\theta_{м1}\cdot\cos(4\Omega_\theta t+4\theta_0+\varphi_1)+8\Delta\theta_{м2}\cdot\cos(8\Omega_\theta t+8\theta_0+\varphi_2)+$$

$$+12\Delta\theta_{м3}\cdot\cos(12\Omega_\theta t+12\theta_0+\varphi_2)+\ldots]=-\frac{\Omega_\theta}{K_{уст}}\cdot[1+4\Delta\theta_{м1}\cdot\cos(4\Omega_\theta t-\varphi_{\Omega1})+$$

$$+8\Delta\theta_{м2}\cdot\cos(8\Omega_\theta t-\varphi_{\Omega2})+12\Delta\theta_{м3}\cdot\cos(12\Omega_\theta t-\varphi_{\Omega3})+\ldots], \qquad (7)$$

где $\varphi_{\Omega1}, \varphi_{\Omega2}, \varphi_{\Omega3}, \ldots$– начальные фазы гармоник периодической составляющей функции $\Omega_{изм}(t)$:

$$\varphi_{\Omega1}=-(4\theta_0+\varphi_1),\quad \varphi_{\Omega2}=-(8\theta_0+\varphi_2),\quad \varphi_{\Omega3}=-(12\theta_0+\varphi_3),\ldots$$

Поскольку по формуле Брайана [1-3]

$$\Omega_\theta=-\Omega\cdot K, \qquad (8)$$

то (7) запишем в виде

$$\Omega_{изм}(t)=\frac{\Omega K}{K_{уст}}\cdot[1+4\Delta\theta_{м1}\cdot\cos(4\Omega Kt+\varphi_{\Omega1})+8\Delta\theta_{м2}\cdot\cos(8\Omega Kt+\varphi_{\Omega2})+12\Delta\theta_{м2}\cdot\cos(12\Omega Kt+$$

$$\varphi_{\Omega3})+\ldots]=\Omega_{и0}+\Omega_{им1}\cdot\cos(\omega t+\varphi_{\Omega1})+\Omega_{им2}\cdot\cos(2\omega t+\varphi_{\Omega2})+\Omega_{им3}\cdot\cos(3\omega t+\varphi_{\Omega3})+\ldots, \qquad (9)$$

где: ω – круговая частота [рад/с] первой гармоники периодической составляющей функции $\Omega_{изм}(t)$; $\Omega_{и0}, \Omega_{им1}, \Omega_{им2}, \Omega_{им3}, \ldots$– постоянная составляющая [рад/с] и амплитуды [рад/с] гармоник функции $\Omega_{изм}(t)$;

$$\omega=4\Omega K; \qquad (10)$$

$$\Omega_{и0} = \Omega\,C;\ \Omega_{им1} = 4\,\Omega\,C\,\Delta\theta_{м1},\ \Omega_{им2} = 8\,\Omega\,C\,\Delta\theta_{м2},\ \Omega_{им3} = 12\,\Omega\,C\,\Delta\theta_{м3}, \ldots; \qquad (11)$$

$$C = \frac{K}{K_{уст}} \approx 1. \qquad (12)$$

Как видно из (9), функция $\Omega_{изм}(t)$ содержит составляющие: постоянную $\Omega_{и0}$ (11) и переменную периодическую с круговой частотой первой гармоники ω (10). Сравнивая экспериментальные выражения $\Omega_{им1}$ и ω, указанные в разделе 1, соответственно с (11) и (10),(12), находим приближенные экспериментальные значения амплитуды ошибки $\Delta\theta_{м1}$ и масштабного коэффициента K:

$\Delta\theta_{м1} \approx 0{,}0066/4 = 0{,}00165$ рад = 5,7 угл. мин.;

K $\approx$1,09/4 = 0,27.

Откуда (используя (6),(12)) вычисляем приближенную экспериментальную амплитуду первой гармоники периодической ошибки измерения угла ψ:

$\Delta\psi_{им1} \approx \Delta\theta_{м1}/K = 5{,}7/0{,}27 = 21$ угл. мин.

Из (5), с учетом (8), находим угловой период повторения (по углу ψ) ошибки с амплитудой $\Delta\psi_{им1}$:

$\Omega\,t = 2\pi/4K \approx 2\pi/(4\cdot 0{,}27)$ рад $= 360/(4\cdot 0{,}27)$ угл. град. = 333 угл. град.

Запишем ряд выражений и методику измерения K. Период [с] r-той гармоники $\Omega_{изм}(t)$: $T_r = 2\pi/(r\,\omega)$. Соответственно частота [Гц] r-той гармоники: $f_r = r\omega/2\pi$. Период [с] времени поворота основания на 1 оборот: $T_\Omega = 2\pi/\Omega$.

Для получения более точного значения K, в эксперименте нужно задавать скорость с известным, достаточно точным (желательно наибольшим), постоянным значением Ω и фиксировать значения $\Omega_{изм}$ через малые известные промежутки времени (обеспеченные номиналом и стабильностью частоты кварцевого генератора). Тогда время на графике $\Omega_{изм}(t)$ определяется количеством соответствующих значений $\Omega_{изм}$. Причем при построении этого графика следует исключить постоянную составляющую $\Omega_{и0}$ (при компьютерной обработке в программе Excel это осуществляется автоматически). Необходимо подсчитать число периодов N_r (гармоники “r”) за желательно большой известный отрезок времени t_N и определить период (T_r) этой гармоники по формуле: $T_r = t_N/N_r$.

В результате из (10) определяем масштабный коэффициент.

$$K = \frac{\omega}{4\Omega} = \frac{2\pi}{4\Omega \cdot r \cdot T_r} = \frac{T_\Omega}{4r \cdot T_r} = \frac{T_\Omega \cdot N_r}{4r \cdot t_N} \tag{13}$$

Для оценивания значения K на данном образце ВТГ-ИГД (с фильтром нижних частот для цифровых сигналов с выходов «As» и «Ac»), в течение 30с были проведены измерения с записью значений $\Omega_{изм}$ при $\Omega =$ 300±0,004 угл.град./с (T_Ω=360/(300±0,004) с). На построенном графике $\Omega_{изм}(t)$ для r = 1 зафиксировано $N_1 =$ 26 периодов за $t_N =$ 28,130±0,005 с. Следовательно, из (13) измеренное приблизительно за 30с среднее значение масштабного коэффициента:

$$K = \frac{360 \cdot 26}{(300{,}000 \pm 0{,}004) \cdot 4 \cdot 1 \cdot (28{,}130 \pm 0{,}005)} = 0{,}27728 \pm 0{,}00005.$$

3. Выводы

1. Алгоритм определения угла (θ) ориентации стоячей волны ВТГ-ИГД с использованием выражения (2)(т.е. $2\theta = \operatorname{arctg}(B)$), из-за ограниченности разрядной сетки ВБ при оперировании значениями B, теоретически достигающими ±∞, вызывает искажения в измерении углов θ и ψ, а также проекции (Ω_a) угловой скорости вращения гироскопа на ось его чувствительности. Эти ошибки (разности между измеренными и истинными значениями указанных параметров) изменяются в зависимости от угла θ с периодом функции $\sin(4\theta)$ (или $\cos(4\theta)$). При вращении такого гироскопа вокруг его оси чувствительности с постоянной скоростью Ω, угол θ изменяется линейно от времени ($\theta = \theta_0 + \Omega_\theta t = \theta_0 - \Omega K t$). И измеренные значения ($\Omega_{изм}$) скорости ($\Omega_a = \Omega$) обладают той особенностью, что имеют помеху, изменяющуюся с периодом функции $\cos(4\Omega K t)$, то есть с круговой частотой $\omega = 4\Omega K$.

2. Для исключения указанных ошибок (с избежанием переполнения разрядной сетки ВБ) следует вычислять угол 2θ, используя преобразованное выражение (2) с введением интервалов изменения B, например:

$$2\theta = \begin{cases} -\pi/2 - \operatorname{arctg}(1/B), \ldots\ldots\ldots B < -1; \\ \operatorname{arctg}(B), \ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots\ldots -1 \le B \le 1; \\ \pi/2 - \operatorname{arctg}(1/B), \ldots\ldots\ldots\ldots B > 1. \end{cases} \tag{14}$$

3. Как видно из изложенного, масштабный коэффициент гироскопа может быть определен при задании ВТГ-ИГД вращения вокруг оси чувствительности с постоянной

угловой скоростью Ω и фиксации значений $\Omega_{изм}$. При этом просматриваются два способа измерения.

Практический способ состоит в том, что (как при наличии, так и при отсутствии методической ошибки измерения угла θ) на графике $\Omega_{изм}(t)$ можно отметить значение $\Omega_{и0}$, которое определяется линией тренда (с линейной аппроксимацией, например, в программе Excel). И, при известном значении $K_{уст}$, из (11), (12) можно найти значение K:

$$K = K_{уст} \frac{\Omega_{и0}}{\Omega}. \qquad 15)$$

При этом введение числа $K_{уст}$ обеспечивается записью калибровочных коэффициентов. Поэтому достоинство этого способа − экспериментальный подбор этих коэффициентов (с повторными измерениями заданной скорости Ω) для практического получения $\Omega_{и0} = \Omega$ (и соответственно $K_{уст} = K$).

Однако, применение формулы (15) для численного определения K сопряжено с тем недостатком, что, из-за наличия калибровочных коэффициентов, реальное значение $K_{уст}$ не всегда может быть точно определено. Способ же нахождения K с внесением периодической ошибки $\Delta\theta$ (с использованием (13)) требует измерения только одного возобновляемого параметра (частоты f_r или периода $T_r = 1/f_r$ r-той гармоники периодической функции $\Omega_{изм}(t)$). И точность измерения f_r (соответственно K) повышается с увеличением времени снятия данных $\Omega_{изм}$. В тексте был указан графический метод измерения f_r для r = 1. Помимо него, можно применить метод преобразования цифрового сигнала “Ω_a” в аналоговый с последующей фильтрацией. При этом частоту гармоники f_r (или период T_r) непосредственно можно измерить с помощью анализатора спектра или (и) частотомера.

4. Результат измерения масштабного коэффициента на данном экспериментальном образце ВТГ-ИГД (K = 0,2773) практически совпал со значением (K = 0,277) расчетов [5-7]. Тем самым подтверждается обоснованность указанных теоретических разработок.

5. Обычно при настройке ВТГ-ИГД проводят технологические работы по определению и подтверждению констант для ВБ, а также по занесению их в память ВТГ. Предложенный способ позволил в цикле производства ВТГ более точно измерять масштабный коэффициент K.

Изложим соображения по применению этих измерений. Периодическая составляющая функции $\Omega_{изм}(t)$ представляет собой помеху штатной работе ВТГ-ИГД в системах управления и навигации. Для рассмотренного опытного образца уровень полученной помехи ($\Delta\Psi_{им1}$=21 угл. мин., $\Omega_{им1}/\Omega \approx$ 0,0066) оказывается достаточным для измерения масштабного коэффициента. И этот образец может быть использован в тех системах, где вносимой ошибкой с указанным уровнем можно пренебречь. Соответственно для вновь разрабатываемых гироскопов (с применением вычислений (2)), если уровень (достаточный для определения K) превышает допускаемый, то необходимо обеспечить штатную работу без искажений (с использованием (14)). Технологические же измерения K возможно организовать программой тестовых проверок, вносящей периодическую ошибку измерения θ (например, за счет использования алгоритма (2) с одновременным программным ограничением числа “B”) и начинающей выполнение операций по команде оператора.

Библиографический список

1. Журавлев В.Ф., Климов Д.М. Волновой твердотельный гироскоп. – М.: Наука, 1985.-125 с.
2. Пельпор Д.С. и др. Гироскопические приборы и системы. – М.: Высш. шк., 1988.-424 с.
3. Матвеев В.А., Липатников В.И., Алехин А.В. Проектирование волнового твердотельного гироскопа. – М.: Изд-во МГТУ им. Баумана, 1998.- 168 с.
4. Матвеев В.А., Лунин Б.С., Басараб М.А. Навигационные системы на волновых твердотельных гироскопах. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2008.- 240 с.
5. Егармин Н.Е. Динамика неидеальной оболочки и управление её колебаниями// Изв. АН. Механика твердого тела. 1993. №4. С.49-59.
6. Басараб М.А., Кравченко В.Ф., Матвеев В.А. Математическое моделирование физических процессов в гироскопии. Монография. – М.: Радиотехника, 2005.- 176 с.
7. Меркурьев И.В., Подалков В.В. Динамика микромеханического и волнового твердотельного гироскопов. – М.: ФИЗМАТЛИТ, 2009.- 228 с.
8. Лунин Б.С. Физикохимические основы разработки полусферических резонаторов волновых твердотельных гироскопов. – М.: Изд-во МАИ, 2005.- 224 с.
9. Журавлев В.Ф. О дрейфе волнового твердотельного гироскопа (ВТГ) на вращающемся основании при управлении квадратурой в режимах “быстрого” и “медленного” времени// Изв. РАН. Механика твердого тела. 2003. №3. С.13-18.
10. Захарин А.В. и др. Твердотельный волновой гироскоп// Патент РФ. 7G01C 19/56. RU 2362975. (2006).

Сведения об авторе

Захаров Александр Александрович, ведущий инженер ФГУП ГосНИИП, 129226, Москва, проспект Мира, 125, телетайп 112654, телеграф «Корунд», e-mail:corund@col.ru